

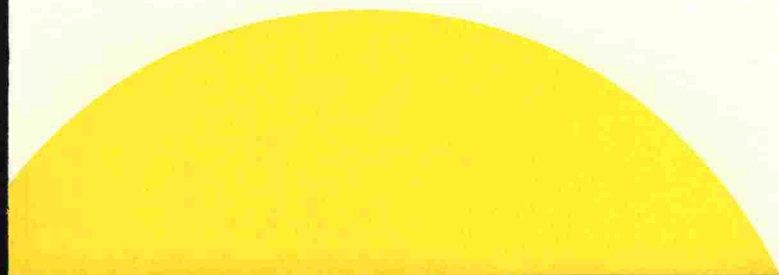


**Risto Alkio, Markku Juvankoski, Leena Korkiala-Tanttu, Rainer Laaksonen,  
Kyösti Laukkanen, Sami Petäjä, Jari Pihlajamäki, Harri Spoof**

# **Tien rakennekerrosten materiaalit**

**Taustatietoa materiaalivalinnoille**

**Tiehallinnon selvityksiä 66/2001**



**Risto Alkio, Markku Juvankoski, Leena Korkiala-Tanttu, Rainer Laaksonen,  
Kyösti Laukkanen, Sami Petäjä, Jari Pihlajamäki, Harri Spoof**

# **Tien rakennekerrosten materiaalit**

**Taustatietoa materiaalivalinnoille**

**Tiehallinnon selvityksiä 66/2001**



ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-821-1  
TIEH 3200712

Edita Oyj  
Helsinki 2001

Julkaisua myy/saatavana:  
Tiehallinto, julkaisumyynti  
faksi 0204 22 2652  
e-mail [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi)  
[www.tiehallinto.fi/julk2.htm](http://www.tiehallinto.fi/julk2.htm)



TIEHALLINTO  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihde 0204 22 150

Risto Alkio, Markku Juvankoski, Leena Korkiala-Tanttu, Rainer Laaksonen, Kyösti Laukkanen, Sami Petäjä, Jari Pihlajamäki, Harri Spoof: Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Helsinki 2001. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. 139 s. + liite 2 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-821-1, TIEH 3200712.

**Asiasanat:** Kiviainekset, rakennekerrokset, materiaalit, ominaisuudet, mitoitus

**Aiheluokka:** 56

## TIIVISTELMÄ

Tässä raportissa on esitetty tierakennusmateriaalien ominaisuuksia sekä mitoitusparametreja ja niiden riippuvuutta erilaisista tierakenteeseen kohdistuvista rasituksista. Raportissa käsitellään erikseen sitomattomat materiaalit, bitumilla sidotut materiaalit, sementillä sidottu moreenimurske ja komposiittimateriaalit. Parametreja on esitetty myös taulukkomuodossa ja ne ovat tarkoitetut auttamaan suunnittelijaa ko. rakenteeseen ja ko. olosuhteisiin sopivan rakennemateriaalin valinnassa.

Materiaalien käsittelyn yhteydessä on mainittu ja joissakin tapauksissa myös lyhyesti kuvattu ne menetelmät (laboratorio- tai in situ menetelmä / mittaus), joilla raportissa esitetyt parametrit on määritetty ja tulee määrittää (TPPT:n mitoitusjärjestelmän tarpeisiin).

Raportin laadinnassa on lähtöaineistona käytetty

- TPPT-ohjelman yhteydessä tehtyjen materiaalitutkimusten tuloksia
- Normien tai ohjeiden materiaaliominaisuustietoja (lähinnä vain bitumilla sidotuissa materiaaleissa)
- Tielaitoksen muualla teettämien tutkimusten tuloksia siinä määrin, kun tulokset ovat olleet raportin laatijoilla käytettävissä ja käsiteltynä raportoinnin kannalta käyttökelpoiseen muotoon ja tulosten käyttökelpoisuus on voitu arvioida
- Edellä esitetyin perustein on käsitelty myös muiden raportin laadinta-aikana käytettävissä olevien tutkimusten tuloksia.

Ulkomaisten tutkimusten tuloksia ei ole tähän raporttiin koottu, mutta on kuitenkin mainittu sellaisia julkaisuja, joista tuloksia on saatavissa.

Risto Alkio, Markku Juvankoski, Leena Korkiala-Tanttu, Rainer Laaksonen, Kyösti Laukkanen, Jari Pihlajamäki, Sami Petäjä, Harri Spoof: Tien rakennekerrosmateriaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. [Road construction materials. Background information for material choice.] Helsinki 2001. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. 139 s. + liite 2 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-821-1, TIEH 3200712

**Key words** Pavement, construction layers, materials, properties, dimensioning

## ABSTRACT

This rapport presents the properties and design parameters of road construction materials and their interdependence with the different stress states in a road construction. The unbound, bituminous-bound, cement-bound gravel moraine and bitumen-cement composite materials are dealt in separate chapters. The rapport exhibits some design parameters in tables too. These table values help the designer to choose a suitable material for a given construction and circumstances.

We have named the laboratory and in situ methods or measurements by which the presented parameters have been defined in each material chapter. In some cases we have also shortly presented them. If TPPT's design system is adopted, these methods or measurements should also be used to define including parameters.

This rapport bases on these data:

- the results of the material research project of TPPT
- the data of material properties of the norms and guidelines (concerning mostly the bituminous-bound materials)
- the research results of the other research projects of Finnish National Road Administration. We have used this data only if it has been available in a suitable format and if it has been possible for us to evaluate its applicability properly.
- the research results of other available projects. Same criteria as above have been used to evaluate this data.

We have not included the research results of foreign research projects to this rapport. Yet, we have mentioned some publications, which results are available.



## ALKUSANAT

Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelman (TPPT) lopputulosten tavoitteena on entistä kestävämpien uusien ja perusparannettavien kestopäällystettyjen teiden rakentaminen siten, että myös rakenteiden vuosikustannukset alenevat. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on tärkeää, että tierakenteet suunnitellaan paikallisiin olosuhteisiin. Suunnittelussa käytetään hyväksi paikallisten olosuhteiden suomat mahdollisuudet ja otetaan huomioon olosuhteiden asettamat rajoitukset.

TPPT-ohjelmassa kehitetään tierakenteiden mitoitusta (TPPT-suunnittelujärjestelmä). Suunnittelujärjestelmässä esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kuormituskestävyyden, roudan vaikutusten ja painuman hallinnan osalta kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoitaa. Myös tierakenteen elinkaarikustannustarkasteluiden suorittamiseksi esitetään menettelytapa..

Suunnittelujärjestelmälle on ominaista, että mitoitus tapahtuu paikkakohtaisilla tiedoilla ja parametreilla (liikenne, ilmasto, pohjamaa, käytettävät rakennemateriaalit, vanhat rakenteet). Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokokeilla tai maastossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Myös muiden mitoituksessa tarpeellisten lähtötietojen hankinnassa ja ongelmakohtien tai muutoskohtien paikannuksessa käytetään maastossa ja tiellä tehtäviä havaintoja ja mittauksia.

Suunnittelujärjestelmään kuuluvat oleellisena osana sitä täydentävät suunnittelun ja mitoituksen lähtötietojen hankintaa käsittelevät ”menetelmäkuvaukset”. Esitettävät menetelmät ja menettelytavat on todettu käyttökelpoiksi käytännön havaintojen ja kokeiden perusteella.

Ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä koerakenteista. Koerakenteista saatuja havaintoja ja kokemuksia on käytetty hyväksi mitoitusten menettelyiden sekä menetelmäkuvausten kehittämisessä ja laadinnassa.

Tässä raportissa on esitetty tierakennusmateriaalien ominaisuuksia sekä mitoitusparametreja ja niiden riippuvuutta erilaisista tierakenteeseen kohdistuvista rasituksista. Raportissa käsitellään erikseen bitumilla sidotut materiaalit, sementillä sidotut materiaalit, komposiittimateriaalit ja sitomattomat materiaalit.

Tämän raportin laadintaan ovat osallistuneet seuraavat VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkijat

- moduulit: Rainer Laaksonen ja Leena Korkiala-Tanttu
- sitomattomat materiaalit: Markku Juvankoski ja Rainer Laaksonen
- sementillä sidottu moreenimurske: Risto Alkio ja Rainer Laaksonen
- komposiittimateriaalit: Kyösti Laukkanen
- bitumilla sidotut materiaalit: Harri Spoof, Jari Pihlajamäki ja Sami Petäjä

Syyskuussa 2001  
Markku Tammirinne

## SISÄLTÖ

1. JOHDANTO	13
2. MODUULI	15
2.1 Tierakenteen mitoitus	15
2.2 Sitomattoman materiaalin jäykkyysmoduuli	18
2.3 Sidottujen materiaalien moduulit ja määritysmenetelmät	20
2.4 Rakenteen muodonmuutosvastuksen mittaukseen perustuvat moduulit	23
2.5 Yhteenvedo materiaalien moduulimääritysmenetelmistä	23
2.6 Kirjallisuusviitteet lukuun 2	24
3. TIERAKENTEEN TOIMINNALLINEN MITOITUS	25
3.1 TPPT-suunnittelujärjestelmä	25
3.2 Kirjallisuusviitteet lukuun 3	27
3.3 LIITTEET lukuun 3	27
4. SITOMATTOMAT MATERIAALIT	29
4.1 Toiminnalliset kerrosten mitoitusparametrit ja jännitystila rakennekerroksissa	29
4.1.1 Mitoitusparametrit ja niihin vaikuttavat tärkeimmät tekijät	29
4.1.2 Jännitystila rakennekerroksissa	32
4.2 Ympäristöolosuhteet ja -rasitukset	35
4.2.1 Rakenteen ja pohjamaan kosteusvaihtelut	35
4.2.1.1 Vaikutus sitomattomien kerrosten kuormituskestävyyteen	35
4.2.1.2 Vaikutus pohjamaan urautumiseen roudan sulamiskautena	36
4.2.2 Muut rasitukset	37
4.3 Sitomattomien materiaalien ominaisuudet	38
4.3.1 Tutkimusten tausta-aineisto	38
4.3.2 Sitomattomiin materiaaleihin liittyviä ulkomaisia tutkimuksia	40
4.3.3 Muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät	42
4.3.3.1 Rakeisuusmuuttujat	42
4.3.3.2 Kosteustila	45
4.3.3.3 Tiiviystila	49
4.3.3.4 Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet ja kiviaineksen mineraloginen koostumus	52
4.4 Muodonmuutosominaisuudet	54
4.4.1 Kiviainesten jäykkyysmoduuli	54
4.4.2 Poisson luku	58
4.5 Kirjallisuusviitteet lukuun 4	61
4.6 LIITTEET lukuun 4	62
5. BITUMILLA SIDOTUT MATERIAALIT	91
5.1 Yleistä	91
5.2 Kulutuskerroksen materiaalit	91
5.2.1 Yleiset valintaperusteet	91

5.2.2	Asfalttibetoni AB	91
5.2.2.1	Asfalttibetoni AB16	91
5.2.2.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	92
5.2.3	Kivimastiksiasfaltti SMA	96
5.2.3.1	SMA 16	96
5.2.3.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	97
5.2.4	Pehmeä asfalttibetoni PAB-B	100
5.2.4.1	PAB-B 16	100
5.2.4.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	101
5.2.5	Pehmeä asfalttibetoni PAB-V	102
5.2.5.1	PAB-V 16	102
5.2.5.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	103
5.3	Sidekerroksen materiaalit	104
5.3.1	Sidekerroksen asfalttibetoni ABS	104
5.3.1.1	ABS 22	104
5.3.1.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	105
5.4	Kantavan kerroksen materiaalit	107
5.4.1	Asfalttibetoni ABK	107
5.4.1.1	ABK 32	107
5.4.1.2	Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit	108
5.4.2	Vaahto bitumistabilointi VBST	110
5.4.2.1	Deformoituminen ja väsyminen	111
5.4.3	Bitumiemulsio stabilointi BEST	112
5.4.4	Remix stabilointi REST	113
5.5	Kirjallisuusviitteet lukuun 5	113
6.	KOMPOSIITTIMATERIAALIT	114
6.1	Yleistä	114
6.2	Tutkimusmenetelmien valinta	115
6.3	Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti	115
6.3.1	Käyttökohteet	115
6.3.2	Koostumus	115
6.3.3	Ominaisuudet	117
6.3.4	Mitoitus	117
6.4	Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti	119
6.4.1	Käyttökohteet ja koostumus	119
6.4.2	Ominaisuudet	120
6.4.3	Mitoitus	120
6.5	Komposiittistabilointi	121
6.5.1	Käyttökohteet ja koostumus	121
6.5.2	Ominaisuudet	122
6.5.3	Mitoitus	122
6.6	Kirjallisuusviitteet lukuun 6	123
6.7	LIITTEET lukuun 6	124
7.	SEMENTILLÄ SIDOTTU MOREENIMURSKE	133
7.1	Yleistä	133
7.2	Materiaaliominaisuudet	133



---

7.2.1	Mitoitusparametrit	133
7.2.2	Puristuslujuus	134
7.2.3	Hydrauliset ominaisuudet	134
7.2.4	Lämmönjohtavuus	134
7.2.5	Routivuus	134
7.2.6	Jäykkyys- ja muodonmuutosmääritykset	135
7.2.6.1	Dynaaminen jäykkyysmoduuli	135
7.2.6.2	Deformaatiokoe	135
7.2.6.3	Poisson luku	135
7.3	Pitkäaikaiskestävyyden toteaminen	136
7.4	Mitoitusparametrien käyttäytymisen syy-seuraussuhteet	136
7.5	Vertailutietoa tavanomaisten rakennekerrosmateriaalien sementtistabiloinnista	137
7.6	Kirjallisuusviitteet lukuun 7	138
7.7	LIITTEET lukuun 7	138

## 1. JOHDANTO

Yleensä tierakenteiden mitoituksessa on pyrittävä käyttämään paikka- ja materiaaliikohtaisesti määritettyjä materiaaliparametreja. Tällä tavalla päästään yleensä kustannuksiltaan ja kestoikältään edullisempiin rakenteisiin kuin keskimääräisiä taulukkoarvoja käyttämällä. Materiaaliikohtaisten parametrien käytöllä on myöskin mahdollista käyttää ko. materiaalin ominaisuudet hyväksi paremmin kuin keskimääräisillä, yleensä konservatiivisilla taulukkoarvoilla. Tällöin on luonnollisesti otettava huomioon paikkakohtaisten parametrien määrittämisen kustannukset. Tästä syystä aivan pienissä ja etenkin vaativuudeltaan alemmissa rakennuskohteissa järkevä taulukkoarvojen käyttö saattaa tulla kysymykseen myös rakennussuunnitelmavaiheessa.

Tässä raportissa on esitetty tierakennusmateriaalien ominaisuuksia sekä mitoitusparametreja ja niiden riippuvuutta erilaisista tierakenteeseen kohdistuvista rasituksista. Raportissa käsitellään erikseen bitumilla sidotut materiaalit, sementillä sidotut materiaalit, komposiittimateriaalit ja sitomattomat materiaalit. Parametreja on esitetty myös taulukkomuodossa ja ne ovat tarkoitettut auttamaan suunnittelijaa ko. rakenteeseen ja ko. olosuhteisiin sopivan rakennusmateriaalin valinnassa. Asiantunteva suunnittelija voi esitettyjen parametrien joukosta valita kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävät parametrit, jos käytettävä materiaali on riittävän tarkasti tiedossa ja materiaali vastaa tässä raportissa esitettyjen materiaalien "tunnistusominaisuuksia".

Tässä raportissa esitettyjä materiaaliominaisuuksia voidaan käyttää hyödyksi myös siten, että kokeilla saatuja materiaaliominaisuuksia verrataan raportissa esitettyihin "lähinnä vastaavien" materiaalien parametreihin. Vertailun avulla voidaan välttää selvästi virheellisten tulosten käyttöönotto.

Materiaalien käsittelyn yhteydessä on mainittu ja joissakin tapauksissa myös lyhyesti kuvattu ne menetelmät (laboratorio- tai in situ menetelmä / mittaus), joilla raportissa esitetyt parametrit on määritetty ja tulee määrittää (TPPT:n mitoitusjärjestelmän tarpeisiin).

Vaikkakin tämä materiaaliraportti on laadittu TPPT tutkimusohjelmaan liittyvänä ja TPPT-mitoitusmenettelyiden näkökulmasta, niin esitettyjä materiaalitietoja voidaan luonnollisesti soveltaa tierakenteiden materiaalivalinnoissa ja kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävästä mitoitusmenetelmästä riippumatta.

Raportin luvussa 2 on selvitetty moduuli-käsitettä. Tässä raportissa on pyritty käyttämään materiaalista riippumatta yleensä termiä "jäykkyysmoduuli". Joissakin kuvissa esiintyy etenkin aiemmista raporteista lainattuna muitakin käsitteitä (esim. jäännösmoduuli), mutta kysymyksessä on kuitenkin jäykkyysmoduuli.



### Lähtöaineisto

Tässä raportissa on lähtöaineistona käytetty

- TPPT-ohjelman yhteydessä tehtyjen materiaalitutkimusten tuloksia
- Normien tai ohjeiden materiaaliominaisuustietoja (lähinnä vain bitumilla sidotuissa materiaaleissa)
- Tielaitoksen muualla teettämien tutkimusten tuloksia siinä määrin, kun tulokset ovat olleet raportin laatijoilla käytettävissä ja käsiteltynä raportoinnin kannalta käyttökelpoiseen muotoon ja tulosten käyttökelpoisuus on voitu arvioida
- Edellä esitetyin perustein on käsitelty myös muiden raportin laadinta-aikana käytettävissä olevien tutkimusten tuloksia.
- Ulkomaisten tutkimusten tuloksia ei ole tähän raporttiin koottu, muuta kuitenkin on mainittu sellaisia julkaisuja, joista tuloksia on saatavissa.

Yksityiskohtaisesti lähtöaineisto on mainittu kunkin materiaalin käsittelyn yhteydessä.

### Rajaukset

Raportissa käsitellään erikseen bitumilla sidotut materiaalit, sementillä sidotut materiaalit, komposiittimateriaalit ja sitomattomat materiaalit. Käsittely kohdistetaan ensisijaisesti TPPT:n mitoitusten kannalta tarpeellisiin ominaisuuksiin ja käyttökelpoisiin tuloksiin. Lähtökohtana materiaalien käsittelyssä on ollut tierakenteen kuormituskestävyysmitoitus.

Routamitoituksen parametritietoja on käsitelty hyvin suppeasti ja vain eräiden materiaalien osalta. Painuman laskennan tarvitsemia materiaaliparametreja ei tässä yhteydessä ole käsitelty. Raportissa ei käsitellä pohjamaata.

Raportissa ei käsitellä myöskään uusiomateriaaleja (teollisuuden sivutuotteita) eikä keinotekoisia / tehdasvalmisteisia rakennemateriaaleja. Uusiomateriaalien ominaisuuksia on käsitelty mm. vuosina 1994-99 toteutetun ympäristögeotekniikka-ohjelman raporteissa.

Tässä raportissa esitetyt materiaalien ominaisuudet ja parametrit eivät ole millään tavalla "virallisesti" hyväksytyjä arvoja, elleivät ne ole esitetty myös joissain ohjeissa tai standardeissa ja ovat sitä kautta jonkin tahon virallisesti hyväksymiä.

Kun esitetyt parametriarvot perustuvat laboratoriokokeisiin, niin ne pätevät ahtaasti tulkiten vain niissä olosuhteissa, jotka vastaavat laboratoriokokeissa vallinneita / simuloituja olosuhteita ja rasiuksia.

Raportissa jokainen materiaalityyppi on käsitelty omana lukunaan siten, että kussakin luvussa on oma numerointinsa kaavoille, kuville, taulukoille, kirjallisuusviitteille ja liitteille.

## 2. MODUULI

Moduulilla tarkoitetaan materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen välistä suhdetta. Moduuli kuvaa siis materiaalin jäykkyyttä (esim. kokoonpuristuvuutta ja taipuisuutta).

Kuormituskokeita on monenlaisia (esimerkiksi yksiakseliset puristuskokeet ja kolmiakselikokeet, taivutusvetokokeet, leikkauskokeet jne.) ja kuormitus voidaan toistaa useita kertoja peräkkäin. Kokeiden suoritustapa ilmaistaan moduulin määritteillä kuten leikkausmoduuli, taivutusjäykkyyssmoduuli jne.

Eri materiaalityypit ja kuormitustavat – sidotut ja sitomattomat / puristetut, leikatut ja vedetyt – edellyttävät myös erilaisten koetekniikoiden käyttöä.

Staattinen moduuli on staattisella kuormituskokeella (yksi koestussykli) ja vastaavasti dynaaminen moduuli on dynaamisella kokeella (useita syklejä lyhyellä aikavälillä) määritetty moduuli. Näitä nimityksiä käytetään, kun halutaan erityisesti korostaa kuormituksen toistoa.

Sitomattomilla, karkearakeisilla materiaaleilla kuormitusnopeus vaikuttaa jäykkyyteen vain vähän. Veden kyllästämällä hienorakeisilla materiaaleilla kuormitusnopeus alkaa vaikuttaa jäykkyyteen. Bitumilla sidottujen materiaalien jäykkyyteen kuormitusnopeus vaikuttaa merkittävästi.

Moduulikäsitteen selventämiseksi käsitellään alla erilaisia moduulityyppejä sekä niiden käyttötarkoituksia ja määrittystapoja.

### 2.1 Tierakenteen mitoitus

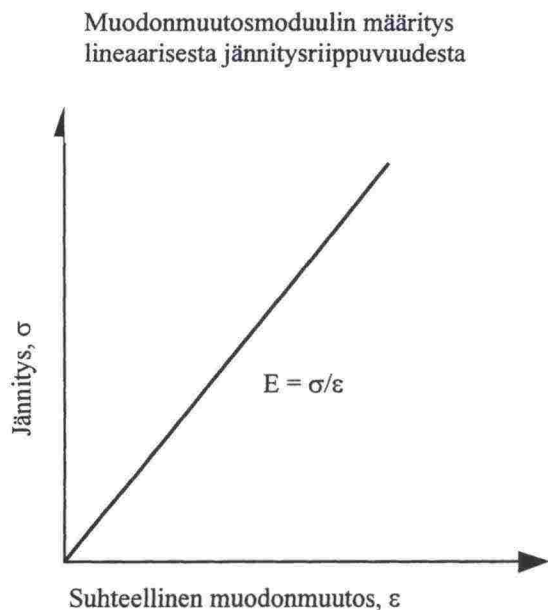
Tierakenteen TPPT-suunnittelujärjestelmän mukainen analyyttinen kuormituskkestävyysmitoitus edellyttää rakennekerrosten muodonmuutosominaisuuksien kuvausta moduulin (palautuva muodonmuutos) ja Poisson luvun avulla. Lisäksi pitäisi kunkin kerroksen kumuloituvat pysyvät muodonmuutokset arvioida jonkin kerroskohtaisen kuormituskertalukua ja pysyvää muodonmuutosta kuvaavan yhteyden avulla.

Tierakennetta analysoitaessa oletetaan yleensä, että materiaalien kerroskohtaiset ominaisuudet pysty- ja vaakasuuntaan ovat samat ja pysyvät vakioina kerroksen sisällä, jolloin kerrosta kohden tarvitaan vain kaksi parametria: moduuli ja Poisson luku. Kuitenkin nämä oletukset pätevät vain harvoin tierakenteessa.

#### Kimmomoduuli

Kimmomoduuli (E) on materiaalin **palautuvan** muodonmuutoksen ja sen aiheuttaneen jännityksen muutoksen suhde (kuva 1):  $E = \sigma / \epsilon$  tai  $E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$ . Kimmomoduuli kuvaa hyvin monien homogeenisten ja isotrooppisten materiaalien, kuten esim. metallien, muodonmuutoskäyttäytymistä.





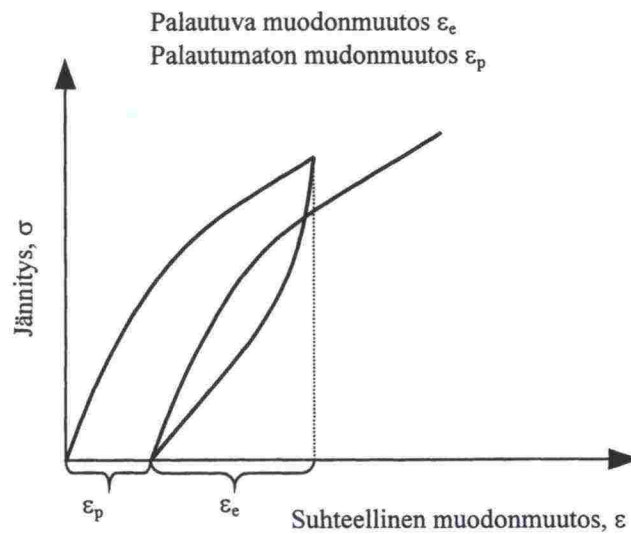
Kuva 1. Lineaarisesti kimmoinen kuormitus-muodonmuutosvaste [1].

Kimmomoduurin estimaatteja voidaan määrittää usealla eri menetelmällä: yksi-/kolmiakselialinen puristuskoe, epäsuora vetokoe (halkaisuvetokoe) ja taivutusvetokoe. Nämä menetelmät eroavat toisistaan käytetyn jännityksen (puristus-/vetojännityskuormitus), käytetyn näytteen geometrian (lieriö, palkki) sekä kuormitustavan (staattinen, syklinen/dynaaminen) osalta. Eri materiaalityypit ja kuormitustavat – sidotut ja sitomattomat / puristetut ja vedetyt – edellyttävät myös erilaisten koetekniikoiden käyttöä. Sidotun päällysteen alareunassa esiintyy kuormitettaessa vetojännitystä. Sitomat- tomilla materiaaleilla kuormitus puolestaan aiheuttaa aina vain puristusjännityksiä, sillä ne eivät kestä vetoa.

Moduulille voidaan määrittää arvoja myös maastossa kokeilla, joita ovat mm. staattinen levykuormituskoe sekä pudotuspainolaitteella tehtävä koe. Erikoisempia, esim. SASW:iin (tärinäaallon analysointiin) perustuvia menetelmiä, ei käsitellä tässä. Maastomenetelmillä ei suoraan voida määrittää rakennekerrosten moduuleja vaan materiaalikohtaiset arvot määritetään takaisinlaskennalla mitatusta koko rakenteen muodonmuutosvasteesta (kuormitus-painuma/painumasuppilo –tieto).

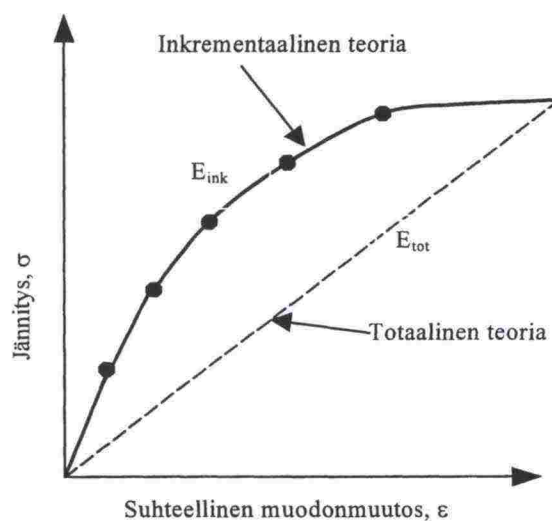
### Elasto-plastinen materiaali

Elasto-plastinen muodonmuutuskäyttäytyminen kuvaa paremmin maarakennusmateriaalien muodonmuutoksia kuin kimmoteoria. Maamateriaalissa kuormitus aiheuttaa aina sekä elastisen (palautuvan) että plastisen (pysyvän) muodonmuutoksen. Elastinen osa johtuu rakeiden muodostaman raerungon palautuvasta kimmoisesta muodonmuutoksesta ja plastinen osa vastaavasti raerungon rakeiden kiertymistä ja liukumista toistensa suhteen (kuva 2).



Kuva 2. Elasto-plastinen kuormitus-muodonmuutosvaste /2/.

Elasto-plastisen muodonmuutoksen määrittämiseen voidaan yleisesti käyttää kahta lähestymistapaa: totaalista ja inkrementaalista menettelyä. Totaalisessa menettelyssä kutakin kuormitusta vastaa (kokonaismuodonmuutos-) moduuli, joka tuottaa yhdistetyn elasto-plastisen muodonmuutoksen (kuva 3). Inkrementaalisessa menetelmässä kokonaiskuormitus jaetaan inkrementteihin ja kuormitusinkrementin aiheuttama muodonmuutos lasketaan käyttäen kunkin jännitysvälin määräämää jäykkyyssmoduulia.

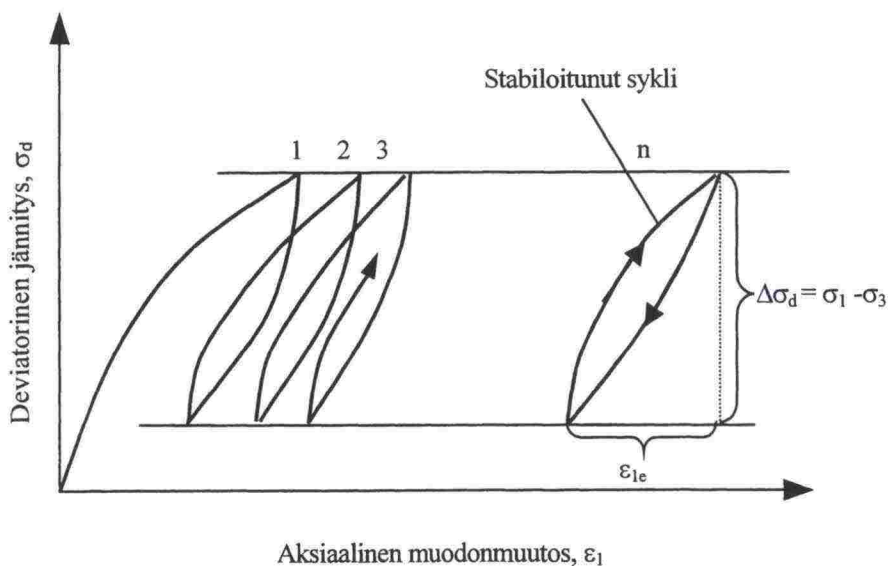


Kuva 3. Totaalinen ja inkrementaalinen muodonmuutoslaskentamenettely /2/.

"Maaelastisuus"

Maamateriaalissa kuormitus aiheuttaa aina sekä elastisen että plastisen muodonmuutoksen. Kun materiaalia kuormitetaan toistuvasti (kuten mm. tiivistystyö ja liikennekuormitus) samalla kuormalla riittävän monta kertaa, niin plastisen muodonmuutoksen osuus pienenee lähes merkityksettömäksi lyhyellä aikavälillä. Tällöin maamateriaalin katsotaan stabiloituvan ja käyttäytyvän maaelastisesti ja sen muodonmuutuskäyttäytymistä voidaan kuvata jännitystilaan sidotulla kimmomoduulilla (tässä raportissa käytetään termiä jäykkyysmoduuli) (kuva 4).

Valitettavasti maamateriaalin syntyy kuitenkin välittömästi plastisia muodonmuutoksia, kun siihen aiemmin aiheutettu jännitys ylitetään tai pääjännitysten keskinäiset suhteet muuttuvat oleellisesti. Maaelastinen käyttäytyminen saattaa hävitä ajoittain myös esim. routimisen aiheuttaman materiaalin löyhtymisen vuoksi.



Kuva 4. Maaelastinen käyttäytyminen /1/.

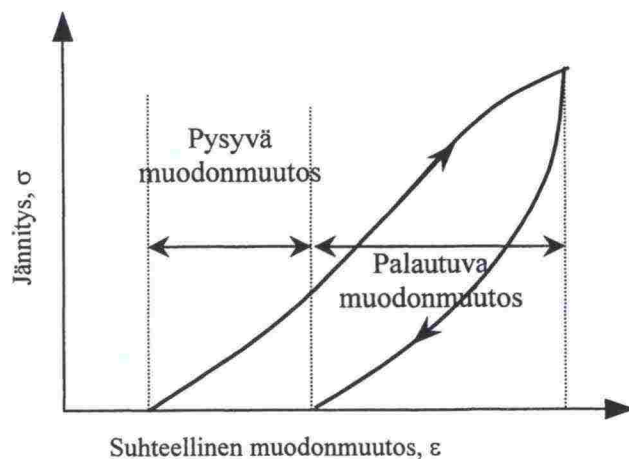
## 2.2 Sitomattoman materiaalin jäykkyysmoduuli

Tierakenteen kuormituskestävyyssmitoituksessa käytetään jäykkyysmoduulia, joka lasketaan kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen palautuvan osan ( $\epsilon_{1r} = \epsilon_{1e}$ ), eli maaelastisen osan avulla (kuvat 4 ja 5). Tienrakenuskäytössä tästä jännitystilasta riippuvasta mitoitusmoduulista käytetään englanninkielistä termiä "Resilient Modulus  $M_r$ ", joka tässä raportissa on korvattu termillä jäykkyysmoduuli (resilient = kimmoisa, palautuva, joustava). Sitomattoman materiaalin jäykkyysmoduuli määritetään yleisesti kaavalla (kaava 1), jos koe on tehty tavanomaisella kolmiakselikokeella, jossa pystyjännitys ( $\sigma_1$ ) muuttuu ja sellipaine ( $\sigma_3$ ) on vakio. Jäykkyysmoduulista käytetään joskus nimeä jäännösmoduuli. Tätä termiä ei kuitenkaan suositella käytettäväksi tulevaisuudessa.



$$M_r = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{1r}} \quad (1)$$

Tyypillisesti sitomattomien materiaalien jäykkyysmoduuli määritetään sykli-  
sellä tai dynaamisella kolmiaksaalikokeella. Näitä kokeita on kahta perus-  
tyyppiä: vakiosellipainekokeita ja muuttuasellipainekokeita. Vakiosellipai-  
nekoe (yksinkertaisempi) tehdään siten, että näytteeseen vaikuttava vaa-  
kajännitys (sellipaine  $\sigma_3$ ) on vakio kokeen ajan. Muuttuasellipainekokeessa  
sellipaine  $\sigma_3$  muuttuu aksiaalisen kuorman muuttuessa. Jälkimmäinen koe-  
menettely toistaa pyöräkuorman tierakenteeseen aiheuttaman kuormitus-  
syklin edellistä menetelmää edustavammin.

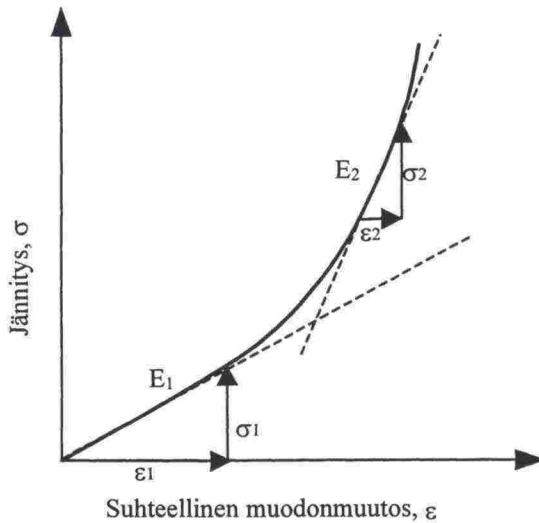


Kuva 5. Yhden kuormitusyökin aiheuttamat muodonmuutokset, palautuvat ja palautumattomat [3/.

Sitomattoman, sulan materiaalin jäykkyysmoduuli on lämpötilasta riippu-  
maton. Maan jäätyminen kasvattaa kuitenkin vettä sisältävän maamateriaa-  
lin jäykkyysmoduulia. Sitomattoman materiaalin jäykkyysmoduuliin vaikuttaa  
voimakkaasti jännitystilän lisäksi materiaalin kosteus- ja tiiveystila.

#### Moduulin jännitystilarippuvuus

Rakeisilla maamateriaaleilla käytännössä toteutuvilla jännitystila-alueilla  
jäykkyysmoduuli (mitoitusmoduuli)  $E$  tai  $M_r$  ei kuitenkaan ole vakio, vaan  
aina voimakkaasti vallitsevan jännitystilän ja kuormituksen aiheuttaman  
jännityslisän funktio (kuva 6). Jännitystila ja -lisä määräytyvät syvyyden, yllä  
olevien kerrosten ominaisuuksien sekä rakenteeseen kohdistuvan liikenne-  
kuorman mukaan.



Kuva 6. Jäykkyysmoduulin jännitystilariippuvuus /1/.

Rakeisen materiaalin kuormitus-muodonmuutosriippuvuus on teoreettisesti-kin tarkasteltuna aina epälineaarinen. Tämä johtuu siitä, että kuormat välittyvät raerungon sisällä rakeilta toisille rakeiden välisten kontaktipisteiden kautta. Kontaktipisteiden ominaisuudet muuttuvat jännitystilan muuttuessa, jolloin vaste on epälineaarinen. Jos kontaktijännitykset (hydrostaattinen = normaalijännitys ja deviatorinen = leikkausjännitys) kasvavat riittävän suureksi raerunkoon syntyy myös plastisia muodonmuutoksia.

Jäykkyysmoduulin arvo määräytyy materiaaliominaisuuksien ja jännitystilan (hydrostaattinen  $\Theta$  ja deviatorinen jännitys  $q$ ) yhteisvaikutuksesta. Yleisesti voidaan sanoa, että hydrostaattisen jännityksen lisäys kasvattaa jäykkyysmoduulia ja deviatorisen jännityksen lisäys pienentää sitä /4/. Tyypillisin tapa ilmaista jäykkyysmoduulin jännitysriippuvuus on kuvata sitä esim. kaavoilla 2 tai 3, joissa  $k_1$ ,  $k_2$  ja  $k_3$  ovat materiaaliikohtaisia parametreja /4/.

$$M_r = k_1 \cdot \Theta_0 \cdot \left( \frac{\Theta}{\Theta_0} \right)^{k_2} \quad (2)$$

$$M_r = k_1 \cdot \Theta_0 \cdot \left( \frac{\Theta}{\Theta_0} \right)^{k_2} \left( \frac{q}{\Theta_0} \right)^{k_3} \quad (3)$$

## 2.3 Sidottujen materiaalien moduulit ja määrittämenetelmät

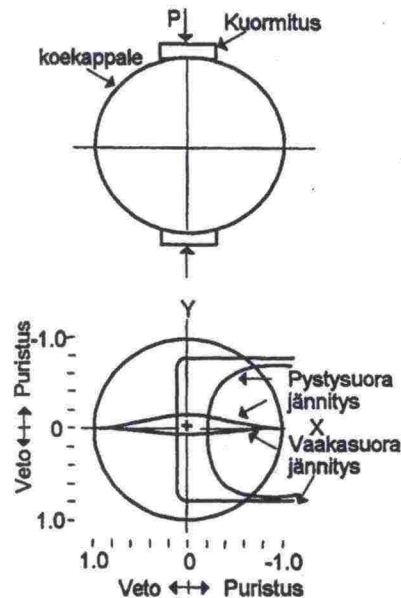
Sidotuille materiaaleille moduuli voidaan määrittää ainakin seuraavilla tavoilla: epäsuora vetokoe –menettelyyn perustuva syklinen kuormituskoe, erilaiset sykliset ja staattiset palkintaivutuskokeet ja yksi-/kolmiakselikokeeseen perustuva syklinen puristuskoe. Toisin kuin sitomattomilla mate-

riaaleilla, bitumia sisältävillä materiaaleilla jäykkyys on aina lämpötilan ja kuormitusnopeuden funktio.

### Epäsuora vetokoe

Sidotun ja koossapysyvän materiaalin jäykkyys voidaan määrittää epäsuora vetokoe –menettelyä käyttäen. Tällöin hyödynnetään pyöreään kappaleeseen kohdistetun viivakuorman aiheuttamaa lähes tasaista vetojännitys-/muodonmuutoskenttää (kuva 7). Menetelmässä käytetty näyte on yleensä päällysteestä porattu tai esim. ICT –laitteella tehty lieriö. Menetelmä soveltuu erityisesti vetokuormitettujen materiaalien jäykkyysmoduulin määrittämiseen.

Menetelmä on kuvattu mm. seuraavissa viitteissä: /1/, /5/, /6/, /7/ ja /8/.

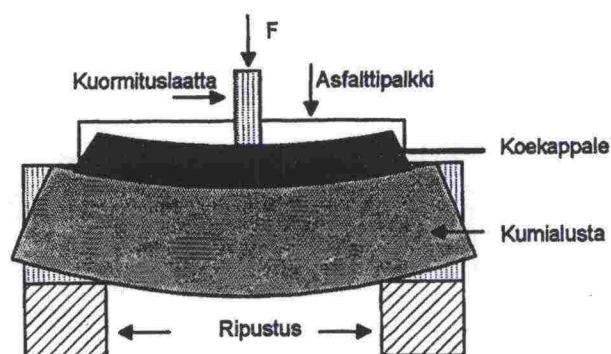


Kuva 7. Epäsuora vetokoe. Jäykkyysmoduulin määrittystapa /1/.

### AVL -koe

Moduulin määrittäminen kimmoisalla alustalla kuormitetusta palkkikokeesta (AVL –koe) on esitetty viitteissä /10/ ja /11/.



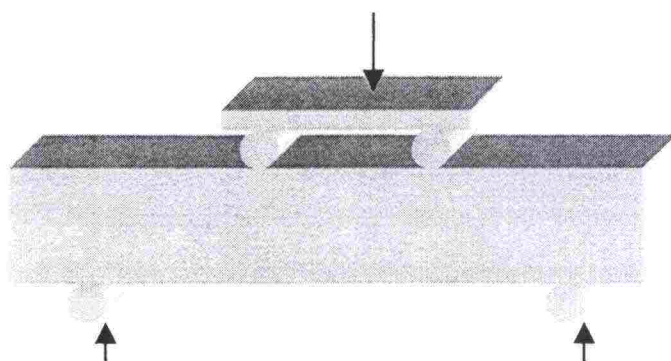


Kuva 8. AVL -laitteen periaatekuva /1/.

### Palkkikoe

Sidotun ja koossapysyvän materiaalin jäykkyys voidaan määrittää palkin taivutus -koetta käyttäen. Tällöin hyödynnetään palkkiin kohdistettujen viivakuormien väliin jäävää tasaista vetojännitys- /muodonmuutoskenttää (kuva 8). Menetelmässä käytetty näyte on yleensä päällysteestä tai laboratoriolaatasta sahattu kappale. Menetelmä soveltuu erityisesti vetokuormitettujen materiaalien jäykkyysmoduulin määrittämiseen.

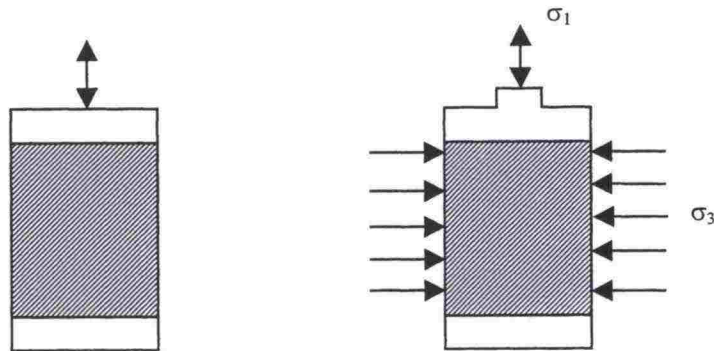
Moduulin määrittäminen staattisesta 4-pistekuormituksesta palkista on kuvattu viitteissä /9/ ja /12/.



Kuva 8. Palkki-/prisma- koe.

### Yksi-/kolmiakselinen sylinterikoe

Moduulin määrittäminen yksi-/kolmiakselikokeeseen perustuvalla menetelmällä on kuvattu viitteissä /8/ ja /13/.



Kuva 9. Yksi- ja kolmiakselialinen kuormituskoe /1/.

## 2.4 Rakenteen muodonmuutosvastuksen mittaukseen perustuvat moduulit

Levykuormitus- ja pudotuspainolaitekokeen tuloksista voidaan takaisinlaskea kerroskohtaiset materiaalimoduulit. Näitä menetelmiä ovat kuvanneet Ehrola /1/ sekä Spoof ja Petäjä /14/.

## 2.5 Yhteenveto materiaalien moduulimäärittämismenetelmistä

Taulukkoon 1 on koottu ne jäykkyysmoduulin määrittämismenetelmät, joita on käytetty ja esitetty raportissa "Tien rakennekerrosten materiaalit".

*Taulukko 1. Eri materiaalien kuormituskestävyyssmitoituksessa käytettävän jäykkyysmoduulin  $M_r$  tai korjatun jäykkyysmoduulin  $M_{rk}$ :n määrittämismenetelmät.*

Materiaaliluokka	Materiaali	Kuormituskestävyyssmitoituksessa käytettävän $M_r$ :n tai $M_{rk}$ :n määrittämismenetelmä
Sitomattomat materiaalit	kaikki	Dynaaminen kolmiakselikoe, yhtälöt 2 -9, taulukko 1
Bitumilla sidotut materiaalit	AB, SMA, PAB-B, PAB-V, ABS, ABK	Dynaaminen epäsuora vetokoe (PANK 4204), taulukko 8, 11, 13, 15 ja 16
	VBST, BEST	Dynaaminen yksi- tai kolmiakselialikoe, taulukko 17
Komposiittirakenteet	Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti	Epäsuora vetokoe, taulukko 19
	Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti	Dynaaminen yksiakselialinen puristuskoe, taulukko 21
	Komposiittistabilointi	Dynaaminen yksiakselialinen puristuskoe, taulukko 23
Hydraulisesti sidotut materiaalit	Sementillä sidottu moreenimurske	Dynaaminen yksiakselialinen puristuskoe, määritettävä materiaaliakohtaisesti

## 2.6 Kirjallisuusviitteet lukuun 2

- /1/ Ehrola, Esko, 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki 1996.
- /2/ RIL 157-2 Geomekaniikka II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 1990.
- /3/ Lekarp, Frederik, 1999. Resilient and permanent deformation behaviour of unbound aggregates under repeated loading. Väitöskirja. KTH, Stockholm 1999.
- /4/ Kolisoja, Pauli, 1997. Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja. TTKK 1997.
- /5/ PANK 4204.
- /6/ FAS Metoder 1995.
- /7/ SHRP P07. Resilient modulus of asphaltic concrete materials, SHRP Designation P07 (7/91)
- /8/ Peltonen, Petri ja Laaksonen, Rainer, 1998. Bitumistabiloidun massan ominaisuudet ja testausmenetelmät. TPPT Tielaitoksen selvityksiä 12/1998.
- /9/ Laukkanen, Kyösti ja Leivo, Markku, 1995. Bitumi-sementtimassakomposiittien soveltuvuus tien päällysrakenteeseen. TPPT Väliraportti nro M5.
- /10/ PANK 4206, Asfalttipäällyste, Väsymiskoe
- /11/ Fatigue test program, users manual 1989. Sintef report STF61 F89027.
- /12/ CEN prEN 12697-26. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. Versio Nov. 1999.
- /13/ CEN TC 227/WG1 WI 00227131. Triaxial cyclic compression test. Versio Dec 1997.
- /14/ Spoof, Harri ja Petäjä, Sami, 2001. Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta. TPPT Menetelmäkuvaus 2.



### 3. TIERAKENTEEN TOIMINNALLINEN MITOITUS

#### 3.1 TPPT-suunnittelujärjestelmä

TPPT-suunnittelujärjestelmän laadinnan lähtökohtana on parantaa niiden tierakenteiden toimintaan vaikuttavien tekijöiden hallintaa, joista tien tasaisuus riippuu. Tasaisuuden valinta yhdeksi tarkastelukulmaksi johtuu mm. siitä, että tien käyttäjä kokee nimenomaan tasaisuuden (ajomukavuuden) merkittävänä tien kunnon mittarina.

Tien tasaisuuden hallinta tapahtuu ensikädessä tierakenteiden mitoituksella. TPPT-tutkimusohjelman projektien tulostavoitteena on rakenteiden toiminnallisiin lähtökohtiin ja ominaisuuksiin perustuvan mitoitusjärjestelmän laadinta. Jotta tie voidaan mitoittaa sen toiminnallisiin vaatimuksiin perustuen, on tunnettava tien toiminnallisten ominaisuuksien riippuvuus sekä pohjasuhteista että rakenneratkaisuista, samoin kuin tien käytönaikaisen käyttäytymisen riippuvuus rakenteissa käytetyistä materiaaleista erilaisissa olosuhteissa ja rasitustiloissa.

Laaditulle TPPT-suunnittelujärjestelmälle on ominaista mm. seuraavat asiat:

1. Kuormituskestävyysmitoituksen osalta suunnittelujärjestelmä on tarkoitettu kestopäällysteisille (AB-, ABK-, SMA-päällysteet) tierakenteille, joissa päällysteen alla ei ole sidottuja kerroksia. Maabetonirakenteita tai muulla tavalla lujitettuja rakenteita eikä kevytpäällysteitä (PAB-, SOP-päällysteet) tässä yhteydessä käsitellä. TPPT-suunnittelujärjestelmän mukaisessa kuormituskestävyysmitoituksessa lähdetään siitä, että kestopäällysteen paksuus on vähintään 60-80 mm.

Tierakenteen yläosan (päällysteen) mitoitus perustuu ns. mekanistis-empiriiseen malliin, jossa analyyttisen teorian mukaan lasketut jännitykset ja muodonmuutokset yhdistetään kentällä havaittuun päällysteen vaurioitumiseen. Routa- ja painumamitoituksessa käytetään analyyttistä mitoitus tapaa. Parametrien määrittämisessä käytetään hyväksi myös empiirisiä havaintoja ja vuorosuhteita.

2. Tierakenteen kuntoon (tasaisuuteen, vaurioitumiseen, urautumiseen) vaikuttavat rakenteen kuormitus-, routa- ja painumakestävyys sekä näiden tekijöiden yhteisvaikutukset. Mitoitus tehdään erikseen liikennekuormitusrasitusten, routarasitusten ja painuman mukaan. Ensin tarkistetaan rakenteen / tien painumat ja pohjanvahvistustoimenpiteiden tarve. Toiseksi mitoitetaan tierakenteen kokonaispaksuus käytettävien materiaalien lämmönjohtavuuden perusteella siten, ettei mitoituksen pohjana olevaa routanousua ylitetä. Lopuksi rakenne mitoitetaan liikennekuormitukselle ja sille tilanteelle, jolloin roudan sulaminen on pehmentänyt rakenteen alimmat osat.
3. Mitoituskriteerit ja mitoituksessa sovellettavat raja-arvot on määriteltävä tien tasaisuuden (tien käyttäjän kokema ajomukavuus) ja tien, erityisesti päällysteen rakenteellisen kestävyys pohjalta. Ne määräävät vähim-

mäistason mitoituksen tuottamalle tien laadulle ja kestoille. Käytettävien raja-arvojen tulee olla sellaisia suureita, että ne ovat ennakolta laskettavissa tai arvioitavissa ja myös sellaisia, että ne olisivat yksikäsitteisesti tiestä mitattavissa olevia. Raja-arvot kuvaavat tien tasaisuutta, joka on TPPT-suunnittelujärjestelmän mitoituksen lähtökohta. Niiden tulisi mielellään olla myös korjausten toimenpiderajoja.

4. Painumamitoituksella haetaan ensin ne kohdat tielinjalla, joissa painuminen ylittää painumakriteerit (painumaerot, kulmakiertymät). Ne kohdat, joissa painumaerojen odotetaan ylittävän sallitun rajan, mitoitetaan pohjanvahvistusmenetelmiä käyttäen siten, että painumat ja painumaerot pysyvät sallituissa rajoissa.
5. Roudan hallinta jakautuu kahteen osaan: routanousun rajoittamiseen ja sulamispehmenemisen haittavaikutusten estämiseen. Epätasainen routanousu aiheuttaa ensisijaisesti rakenteen vaurioitumista riippumatta liikennekuormituksesta. Sulamispehmeneminen vaikuttaa rakenteen kestävyysasteen ensisijaisesti alentuneen pohjamaan kuormituskestävyyden kautta.
6. Routamitoitus perustuu rakennepaksuuksien tai routaeristyksen mitoitamiseen niiden lämmönjohtavuuden, pohjamaan routivuuden, pakkasmäärän ja routanousukriteerin perusteella.
7. Päälysteen kuormituskestävyyden mitoitus perustuu päälysteen alapinnan vaakasuoraan vetomuodonmuutokseen tai taipumaerotukseen (SCI300), jotka selittävät päälysteen väsymisestä aiheutuvaa liikenneperäistä vaurioitumista.
8. Lopuksi koko tierakennetta tarkastellaan ottamalla huomioon pohjamaan kuormituskestävyys roudan sulamisaikana. Pohjamaan kokonaismuodonmuutoksen perusteella arvioidaan pohjamaan urautumisriskiä. Tarkastelussa tarvitaan sulamisvaiheen pituus sekä rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyyden alenema, joka huomioidaan niiden moduulissa.
9. TPPT-suunnittelujärjestelmä sisältää myös vaihtoehtoisten päällysrakennearatkaisujen elinkaarikustannusten arviointimenettelyn. Mitoitettujen rakenteiden elinkaarikustannuksiin perustuvat taloudellisuusvertailut toimivat päätöksenteon tukena valittaessa kohteessa toteutettavaa rakennearkaisua.

TPPT-suunnittelujärjestelmään sisältyvät ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. TPPT-suunnittelujärjestelmässä ei ole käsitelty kaikkia tierakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen kuuluvia tehtäviä (osioita). Käsittelemättömillä osin käytetään tähänkin saakka tierakenteiden suunnittelussa käytettäviä menettelytapoja.

Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokokeilla tai maas-



tossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Parametrien taulukkoarvoja, jotka ovat aina keskimääräisiä, voidaan käyttää alustavassa suunnittelussa ja mitoituksessa (yleissuunnitelmavaiheessa), jos paikkakohtaisia parametreja ei jostain syystä ole vielä käytettävissä.

Käyttämällä rakenteiden suunnittelussa paikkakohtaisia parametreja mitoituksella päästään yleensä kustannuksiltaan ja kestoältään edullisempiin rakenteisiin kuin keskimääräisiä taulukkoarvoja käyttämällä. Materiaalikoh- taisten parametrien käytöllä on myöskin mahdollista käyttää ko. materiaalin ominaisuudet hyväksi paremmin kuin keskimääräisillä, yleensä konservatiivisilla taulukkoarvoilla.

Suunnittelujärjestelmää täydentävät suunnittelun ja mitoituksen lähtötietojen hankintaa käsittelevät "menetelmäkuvaukset", jotka julkaistaan erillisinä raportteina. Suositeltavat menetelmät on todettu käyttökelpoisiksi käytännön havaintojen ja kokeiden perusteella. Suunnittelujärjestelmässä on myös viitattu TPPT-mitointusmenettelyihin soveltuviin ja niitä täydentäviin yleisessä käytössä oleviin tielaitoksen tai muiden organisaatioiden julkaisemiin eritasoisiiin ohjeisiin. Näiden ohjeiden avulla on mahdollista päästä luotettavaan materiaali- ja paikkakohtaisiin parametreihin.

Tässä raportissa on esitetty tierakennusmateriaalien ominaisuuksia myös taulukkomuodossa ja ne ovat tarkoitetut auttamaan valitsijaa ko. rakenteeseen ja ko. olosuhteisiin sopivan rakennusmateriaalin valinnassa. Asiantuntija voi esitettyjen parametrien joukosta valita jopa lopullisessa mitoituksessakin käytettävät parametrit, jos käytettävä materiaali on riittävän tarkasti tiedossa.

### **3.2 Kirjallisuusviitteet lukuun 3**

- /1/ Tierakenteen suunnittelu ja mitointus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Luonnos 31.2.2000. Koekäyttöön tarkoitettu versio.

### **3.3 LIITTEET lukuun 3**

- LIITE 1. Menetelmäkuvausluettelo

## LIITE 1

**Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus  
TPPT Menetelmäkuvaukset (25.9.2001)****Raportti     Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus****Nro**

<b>RAM1</b>	Kuormituskestävyysmitoitus. Päälysrakenteen väsyminen
<b>RAM2</b>	Tierakenteen routamitoitus
<b>RAM3</b>	Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pixelimallilla
<b>RAE1</b>	Päälysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi
<b>RAP1</b>	Mitoituksen lähtötietojen hankkiminen

**TPPT  
Nro****Menetelmäkuvaukset**

1	Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)
2	Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta
3	Liikennesäätösuunnitelman laskeminen
4	Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen
5	Roudan syvyyden määrittäminen
6	Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) kokeellinen määrittäminen
7	Routimiskertoimen määrittäminen
8	Lämmönjohtavuuden määrittäminen
9	Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa
10	Radiometrinen reikämittaus
11	CPTU - kairaus
12	Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin
13	Tien rakennekerrostutkimukset
14	Routanousun ja painuman mittaus
15	Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus
16	PTM -mittausten suoritus ja tulosten hyödyntäminen TPPT-suunnittelujärjestelmässä

## 4. SITOMATTOMAT MATERIAALIT

### 4.1 Toiminnalliset kerrosten mitoitusparametrit ja jännitystila rakennekerroksissa

#### 4.1.1 Mitoitusparametrit ja niihin vaikuttavat tärkeimmät tekijät

Mitoituksessa tierakenne jaetaan kerroksiin: päällyste, kantava kerros, jakava kerros, suodatinkerros ja pohjamaa. TPPT-suunnittelujärjestelmän mukaisessa mitoitusmenettelyssä päällysrakenne mitoitetaan analyttiseen kuormituskestävyysoitoitukseen perustuen. Analyttisen kuormituskestävyysoitoituksen materiaalikohtaiset lähtötiedot ovat jäykkyysmoduuli,  $E$  ja Poisson luku,  $\nu$ .

Koska sitomattomien materiaalien jäykkyys riippuu niiden jännitystilasta ja jännitystasosta, on sitomattomien materiaalien moduulin jännitystilariippuvuus tunnettava. Rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten materiaalien moduuli on sitä suurempi, mitä suurempi jännitystaso rakenteessa on. Kokonaisjännitystaso rakenteen eri syvyyksissä lasketaan kaavalla

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (1)$$

missä,

$\theta$  = pääjännitysten summa, kPa ( $= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )

Rakennetta mitoitettaessa rakennekerrosmateriaalien moduulia korjataan tarvittaessa kuormituksen perusteella materiaalin uutta jännitystilaa vastaavaksi K- $\theta$  mallin kaavalla

$$M_r = K_1 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (2)$$

missä,

$M_r$  = jäykkyysmoduuli, kPa

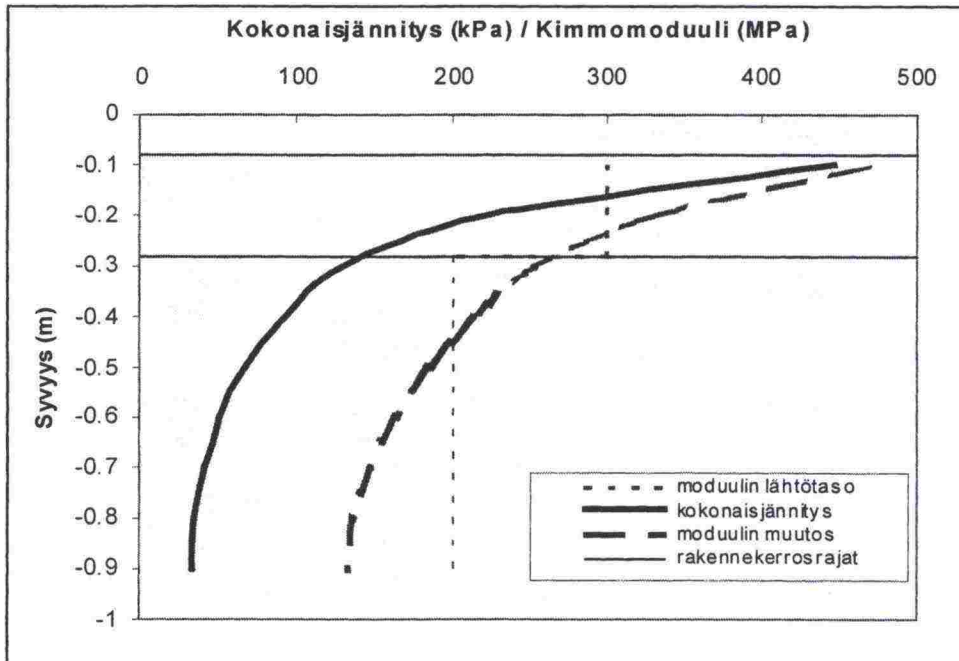
$\theta$  = pääjännitysten summa, kPa ( $= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )

$\theta_0$  = vertailujännitys, 1 kPa

$K_1, K_2$  = materiaaliparametrit

Kuvassa 1 on havainnollistettu moduulien muuttumista jakavassa ja kantavassa kerroksessa rakenteen iteraatioprosessin alkutilan arvoista lopputilan jännitysjakautumaa vastaavaksi. Alkutilan moduulilla tarkoitetaan tässä yhteydessä ensimmäisellä kerralla jännitysten laskemisessa käytettyä kerroksen moduulin arvoa. Periaatteessa kaikista rakenteesta käytettävistä kerrosmateriaaleista tulee tuntea niiden jännitysriippuvuus. Mikäli materiaalien jännitysriippuvuutta ei tunneta, on TPPT-suunnittelujärjestelmässä esitetty käytettäväksi materiaaliparametreille alustavassa mitoituksessa taulukossa 1 esitettyjä tyyppi-arvoja.





Kuva 1. Kokonaisjännitystaso tierakenteessa eri syvyyksillä sekä kokonaisjännitystason vaikutus materiaalien jäykkyyshmoduuliin (periaatekuva).

Taulukko 1. Rakennekerrosten materiaalien parametreille TPPT-suunnittelujärjestelmässä esitetyt tyyppiärvot.

Kerros	$K_1$	$K_2$
Kantava kerros	23 000	0,50
Jakava kerros	24 000	0,49
Suodatinkerros	17 000	0,48

Sitomattomissa materiaaleissa kulloinkin kyseessä olevan materiaalin jäykkyys ja käyttäytymismalli jännityksen suhteen määräytyy siis täysin kahden edellä jäykkyyshmoduulin kaavassa esiintyvän parametrin  $K_1$  ja  $K_2$  perusteella. Mitoituksen luotettavuus riippuu suoraan siitä, kuinka hyvin nämä parametrit kuvaavat kussakin rakennekerroksessa käytettävän materiaalin laatua, tiiviystilaa ja vesipitoisuutta.

Jos tutkitun materiaalinäytteen edustavuus on hyvä, kaikki muut tutkitun materiaalin laatua (maksimi raekoko, rakeisuus käyrän muoto, hienoainespitoisuus jne.) ja tilaa (tiiviystila, vesipitoisuus) kuvaavat tekijät jännitystilaa lukuun ottamatta sisältyvät edellä olevan kaavan parametreihin. Materiaalien parametrit edellä esitettyyn moduulin jännitystilariippuvuutta esittävään kaavaan on siten määritettävä sellaisessa tiiviystilassa ja vesipitoisuudessa, jotka vastaavat rakenteessa toteutuvia olosuhteita. Tämä myös tarkoittaa sitä, että suunnitellun vasteen aikaansaamiseksi materiaalikerrokset on myös rakennettava siihen tiiviystilaan, jossa materiaalin ominaisuudet on määritetty.

Tiivystilan ollessa kuitenkin yksi merkittävimmistä sitomattomien karkeara-keisten materiaalien käyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä moduulin jännitystilariippuvuudelle on kehitetty ja määritetty malleja, joissa myös tiivystilan vaikutus moduuliin voidaan huomioida. Näitä malleja on tarkasteltu jäljempänä.

Rakennekerroksissa vaikuttava käytön aikainen kosteustila on vaikeammin hallittavissa kuin materiaalin tiivystila. Eri kerrosten vesipitoisuudet rakenteissa riippuvat suuresti sekä itse materiaalista että rakenteen muista kerroksista, rakenteen ympäristöstä ja rakenteen sijoittumisesta ympäristöön. Ilman mitään kuivatustoimenpiteitä materiaalien vesipitoisuudet rakenteissa saattavat nousta hyvinkin suuriksi ja vesipitoisuuden vaihtelut rakenteissa mitoituksen ja käytön kannalta hallitsemattomiksi. Asianmukaisia kuivatusjärjestelyitä hyväksikäyttäen rakenteiden kosteuskäyttäytyminen voidaan kuitenkin hallita ja tämän pohjalta määrittää eri materiaalien tavalliset vesipitoisuudet tyypillisissä rakenteissa. Näitä eri materiaaleille esitettyjä vesipitoisuuksia voidaan käyttää hyväksi moduulin määrittämisessä, kun valitaan testaustilanteen vesipitoisuutta.

Taulukossa 1 esitettyjen parametrien  $K_1$  ja  $K_2$  perusteella voidaan havaita, etteivät esimerkiksi kantavalle ja jakavalle kerrokselle esitettyjen parametrien arvot poikkea kovin suuresti toisistaan. Jakavan kerroksen  $K_1$ -arvo on tässä jopa kantavan kerroksen materiaalin arvoa suurempi  $K_2$ -arvojen ollessa samaa suuruusluokkaa. Alhaisilla pääjännityssumman arvoilla jakavan kerroksen moduulille saadaan suurempia arvoja kuin kantavan kerroksen moduulille aina noin pääjännityssummaan  $\theta = 150$  kPa saakka, jonka jälkeen kantavan kerroksen moduuli on lievästi jakavan kerroksen moduulia suurempi.

Käytännössä materiaalin jäykkyyteen ja kerroksessa vaikuttavan moduulin arvoon vaikuttaa merkittävästi rakennekerroksessa vaikuttava jännitystila. Rakenteessa tietyssä pisteessä vaikuttava jännitystila puolestaan riippuu kuormituksen suuruudesta ja rakenteen muista kerroksista ja niiden ominaisuuksista. TPPT-suunnittelujärjestelmässä sitomattomien kerrosten palautuvien muodonmuutosten laskennassa huomioidaan jäykkyyshmoduulin jännitystilariippuvuus, joka on tärkein sitomattoman karkeara-keisen materiaalin muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttava tekijä [5].

Kun rakenteessa käytettävien materiaalien muodonmuutosominaisuudet on määritetty laboratoriokokeissa jännitystilariippuvina, rakenteessa vallitsevat tiivystila ja kosteusolosuhteet huomioiden, on suuri osa näiden tekijöiden vaikutuksesta jo automaattisesti mukana saaduissa tuloksissa. Osa näistä muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä pysyy myös periaatteessa suhteellisen muuttumattomina sen jälkeen, kun materiaali on tiivistetty rakenteeseen. Tämä kuitenkin edellyttää, että on käytetty riittävän hyvälaatuista materiaalia ja että materiaali on oikeassa paikassa rakenteessa.

Tiivys- ja kosteustilan ohella karkeara-keisten sitomattomien materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat myös ns. rakeisuusmuuttujat (raekokojakautuma, maksimiraekoko, hienoainespitoisuus) ja rakeiden fysi-



kaaliset ominaisuudet (raemuoto ja rakeiden pintakarkeus, rakeiden pinta-kitka, rakeiden lujuus ja pysyvyys). Näiden tekijöiden vaikutus materiaalin muodonmuutosominaisuuksiin saattaa kuitenkin olla suuri ja niiden vaikutuksen suunnasta ja suuruusluokasta on syytä olla tietoinen etenkin materiaaleja valittaessa.

#### 4.1.2 Jännitystila rakennekerroksissa

TPPT-suunnittelujärjestelmän mukaisen mitoituksen lähtökohtana on, että käytetään materiaali- ja kohdekohtaisesti määritettyjä parametreja. Pääsääntöisesti parametrien tulisi pohjautua käytettäville materiaaleille laboratoriossa suoritettuihin määrittäksiin. Yleensä, etenkin pienemmissä kohteissa, parametreja ei kuitenkaan välttämättä tapauskohtaisesti tutkita eikä tunneta. Tällöin päällysrakenteen alustavassa mitoituksessa voidaan käyttää materiaaleille tyyppi-arvoja. Käytettävien tyyppi-arvojen pitää perustua materiaalitutkimuksiin, jolloin kokeet on tehty rakenteissa vaikuttavia tyypillisiä tiiviys- ja kosteusolosuhteita edustavassa tilassa. Jos jännitystila rakenteessa kuormituksen yhteydessä pysyy riittävän vakiona, voidaan tyyppi-arvot luonnollisesti muuttaa suoraan rakennekerroksissa mitoituksessa käytettäviksi moduulin vakioarvoiksi. Viitteessä /1/ on selvitetty näitä tyyppimateriaaleille tyypillisissä Suomessa käytettävissä rakenneratkaisuissa vaikuttavia teoreettisia jännitystiloja ja jäykkyysmoduuleita. Näiden tyyppi-arvojen taustalla olevat laskelmat on tehty kimmoteoriaan pohjatuvalle Kenlayer-ohjelmalla, jossa sitomattomien materiaalien moduulit voidaan kuvata pääjännityssummasta riippuvana.

Tyyppimateriaaleja tarkastelussa /1/ ovat olleet

- kantavan kerroksen lievästi lajittunut kalliomurske,
- jakavan kerroksen suhteistunut luonnon sora ja
- suodatinkerroksen rakeisuudeltaan karkea hiekka.

Näiden kerrosten materiaalien materiaaliparametrien arvot on esitetty taulukossa 1.

Tehdyissä tarkasteluissa tyyppimateriaalien on katsottu vastaavan materiaaleja, joilla on rakenteen toiminnan kannalta hyvät muodonmuutosominaisuudet. (Tielaitoksen rakeisuuskäyrään perustuvan arviointimenettelyn mukaan kantavan ja jakavan kerroksen materiaalien E-moduulit ovat tällöin 280 MPa ja suodatinkerroksen materiaalin 100 MPa). Teoreettisia laskelmia on tehty myös ns. heikoilla materiaaleilla, joilla parametrin  $K_1$ -arvoiksi on valittu 75 % tyyppimateriaalien  $K_1$ -arvoista (ks. kappale 4). Tarkasteluissa on vaihdeltu hyvien ja ns. heikkojen materiaalien ominaisuuksien ohella

- AB-päällysteisillä rakenteilla päällysteen paksuutta (40, 80, 120, 160 mm) ja moduulia (2000, 3500, 5000, 7500 MPa),
- suodatinkerroksen paksuutta (160, 360, 560 mm) ja
- alusrakenteen moduulia (10, 20, 40, 60, 80 MPa).

Sekä kantavan kerroksen että jakavan kerroksen paksuus on tarkasteluissa ollut sama 200 mm ja se on ollut vakio muiden tekijöiden vaihdellessa.

Tarkastelut on suoritettu sekä yksittäispyöräkuormitukselle (pintapaine 707 kPa; kuormituspinnan säde  $r=0.15$  m) että paripyöräkuormitukselle (pintapaine 707 kPa;  $r=0.106$  m, pyörien keskipisteiden väli 0.35 m). Kerrosten edustaviksi moduuleiksi on valittu kerroksen korkeuden keskikohdalle yksittäispyörän symmetria-akselilla ja paripyöräkuormituksen symmetriatasolla pyöräkuormista ja geostaattisesta jännityksestä lasketun pääjännityssumman mukaan iteroidut jäykkyysmoduulin arvot (ohjelma asettaa osakerroksessa vaakasuoran jännityksen arvoksi 0, jos vaakasuora jännitys geostaattinen jännitys mukaan luettuna on vetoa). Alusrakenteen yläpinnan jäykkyysmoduuleina ja päällysteen jäykkyysmoduuleina on käytetty vakioarvoja. Rakennekerrosten Poisson lukuna on käytetty arvoa 0.35. Maapohjalla on käytetty Poisson luvun arvoa 0.35 maapohjan ollessa kitkamaata ja arvoa 0.45 maapohjan ollessa koheesiomaata.

Yksittäispyöräkuormituksen tapauksessa kantavassa kerroksessa pääjännitysten summat vaihtelevat välillä 62...427 kPa, jolloin jäykkyysmoduuli vaihtelee vastaavasti välillä 178...456 MPa. Jakavassa kerroksessa arvot ovat vastaavasti pääjännityksen osalta 37...103 kPa ja moduulin osalta 140...227 MPa.

Paripyöräkuormituksen tapauksessa pääjännitysten summat vaihtelevat kantavassa kerroksessa välillä 53...298 kPa, jolloin jäykkyysmoduuli vaihtelee välillä 164...382 MPa. Jakavassa kerroksessa arvot ovat vastaavasti pääjännityksen summan osalta 32...75 kPa ja moduulin osalta 130...196 MPa.

Suodatinkerroksessa pääjännitysten summat ovat yksittäispyöräkuorman tapauksessa 25...50 kPa ja jäykkyysmoduulit 80...112 MPa. Paripyöräkuorman tapauksessa pääjännitykset ovat vastaavasti 24...48 kPa ja jäykkyysmoduulit 79...109 MPa.

Paripyöräkuormituksessa pääjännityssummat ja jäykkyysmoduulit varsinkin pienimmillä päällystepaksuuksilla ovat pienempiä kuin yksittäispyöräkuormituksessa. Suuremmilla päällystepaksuuksilla erot kuitenkin pienenevät.

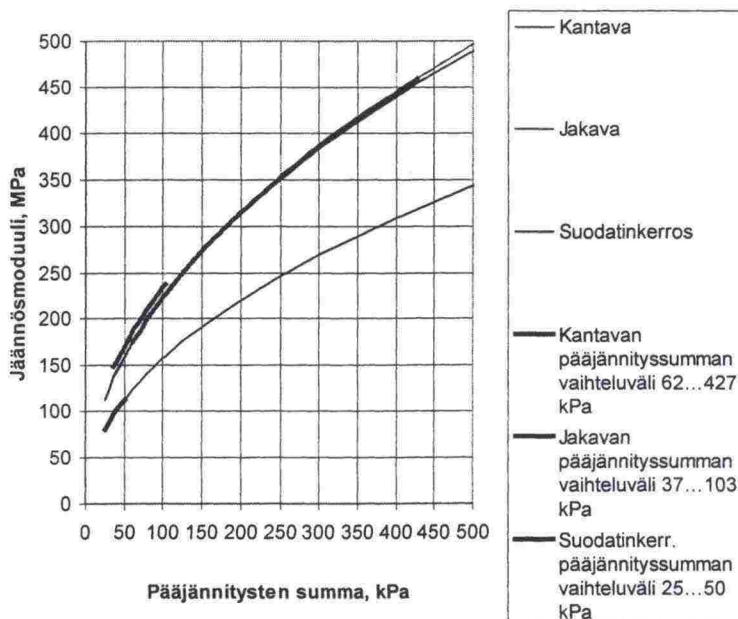
Suodatinkerroksessa jäykkyysmoduulit ovat lähes yhtä suuret kummallakin kuormitusotaksumalla. Jäykkyysmoduulin vaihteluvälin on todettu olevan niin pienen, ettei se juurikaan vaikuta kantavan kerroksen tai alusrakenteen jännitystilaan, jäykkyysmoduuleihin tai kyseessä olevien kerrosten toimintaan. Tästä johtuen käytännössä voidaan suodatinkerroksessa käyttää jäykkyysmoduulille vakioarvoa tierakenteesta riippumatta /1/.

Sen sijaan kantavan ja jakavan kerroksen pääjännitysten summat ja jäykkyysmoduulien vaihteluvälit tyyppimateriaaleilla ovat niin suuria, ettei niille voida käyttää vakioarvoja kummassakaan kerroksessa /1/. Tärkein kantavan ja jakavan kerroksen jännitystiloihin ja jäykkyysmoduulin vaikuttava tekijä on päällysteen paksuus. Mikäli päällystepaksuuden sallitaan vaihtelee-

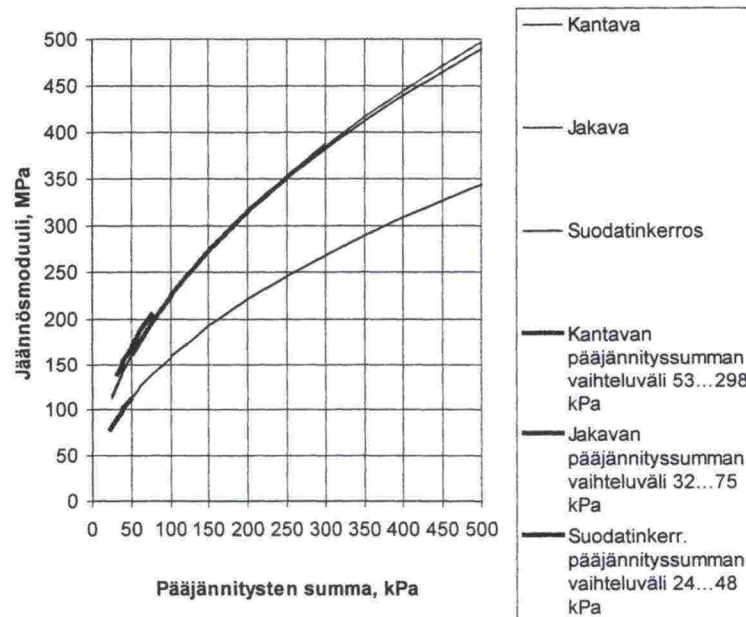


van vain pienissä rajoissa (esim. 80...120 mm), pienenevät pääjännitys-  
summan (48...88 kPa yksittäispyöräkuorma / 39...63 kPa paripyöräkuorma)  
ja jäykkyysmoduulin (158...210 MPa / 143...179 MPa) vaihteluvälit jo merkit-  
tävästi jakavassa kerroksessa. Kantavassa kerroksessa vaihtelut jäävät  
tällöinkin melko suuriksi ( $\theta = 98...268$  kPa;  $M_r = 223...362$  MPa yksittäispyö-  
räkuorma /  $\theta = 75...181$  kPa;  $M_r = 194...301$  MPa paripyöräkuorma).

Tyypimateriaalien materiaaliparametrien mukaiset moduulin riippuvuus-  
suhteet pääjännityssummasta on esitetty kuvissa 2 ja 3. Kuvissa on myös  
esitetty tyyppirakenteiden pääjännitysten vaihteluvälit (AB-päällysteen pak-  
suus vaihtelee välillä 40...160 mm) yksittäispyöräkuormituksessa ja paripyö-  
räkuormituksessa.



Kuva 2. Tyypimateriaalien jäykkyysmoduulit (jäännösmoduuli) rakennekerrok-  
sissa vallitsevan kokonaisjännitystason ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) suhteen sekä pääjän-  
nitysten vaihtelalueet **yksittäispyöräkuormituksessa** tyyppirakenteilla (jaka-  
van alueella moduulin arvoa on nostettu kuvassa 10 MPa ylemmäs havaitta-  
vuuden parantamiseksi) /1/.



Kuva 3. Tyyppimateriaalien jäykkyysmoduulit (jännösmoduuli) rakennekerroksissa vallitsevan kokonaisjännitystason ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) suhteen sekä pääjännitysten vaihtelualueet **paripyöräkuormituksessa** tyyppirakenteilla (jakavan alueella moduulin arvoa on nostettu kuvassa 10 MPa ylemmäksi havaittavuuden parantamiseksi) /1/.

## 4.2 Ympäristöolosuhteet ja -rasitukset

Tiehen syntyy epätasaisuutta ja tierakenne vaurioituu painumien ja liikenne-rasitusten ohella myös pelkästään ilmastorasitusten vaikutuksesta. Suomessa merkittävimmät ilmastorasitukset ovat tierakenteiden ja pohjamaan routaantuminen / routiminen sekä sadanta. Molemmat tekijät aiheuttavat rakenteeseen kosteusvaihteluja, joilla on merkittävä vaikutus materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin. Myös rakenteissa tapahtuva toistuva jäätyminen ja sulaminen vaikuttavat sekä rakeisten että sidottujen materiaalien käyttäytymiseen.

### 4.2.1 Rakenteen ja pohjamaan kosteusvaihtelut

#### 4.2.1.1 Vaikutus sitomattomien kerrosten kuormituskestävyyteen

Veden kulkeutumista ja liikkumista tierakenteeseen ja tierakenteessa aiheuttavat mm. puutteellinen pintakuivatus (riittämätön vietto, pinnan urautuminen, päällysteen halkeilu, päällystämättömän pientareen kautta tierakenteeseen tapahtuva valunta), pohjaveden kulkeutuminen ja virtaukset, veden kapillaarinen nousu huokoisissa materiaaleissa sekä vesihöyryn kulkeutuminen ja tiivistyminen rakenteessa.

Veden pääsyä tierakenteeseen ei voida kokonaan estää, eikä sitä aina ole tarpeenkaan täysin estää. Esim. kun kysymyksessä on routimaton materi-

aali, kuormituskestävyyden kannalta vähän kostea rakennemateriaali on yleensä toimivuudeltaan parempi kuin täysin kuiva materiaali.

Suuri vesipitoisuus kuitenkin aina pienentää maamateriaalien moduuleja. Moduulin pieneneminen voi olla jopa 30...50 % suuruusluokkaa. Merkittävämmiin sitomattomien materiaalin vesipitoisuus vaikuttaa tien kestävyys- ja roudan aiheuttaman sulamispehmenemisen aikaan. Vesipitoisuuden materiaali-kohtaisia vaikutuksia on tarkasteltu tarkemmin jäljempänä.

TPPT-suunnittelujärjestelmässä on kuivatuksen suunnittelua varten esitetty eri rakennekerrosten ja alusrakenteen "normaalit vesipitoisuudet" eli arvot, joita ei yleensä ylitetä oikein kuivatettuna epäedullisissakaan olosuhteissa. Nämä tien rakennemateriaalien ohjeelliset vesipitoisuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 2. Näitä arvoja voidaan käyttää myös materiaalien ominaisuuksia määritettäessä laboratoriokokeiden ohjeellisina tavoitevesipitoisuuksina.

*Taulukko 2. Tien sitomattomien rakennemateriaalien vesipitoisuuden raja-arvot (paino-%), joita ei saa ylittää, ellei rakenteen mitoitus tarkisteta vastaavasti (TPP-suunnittelujärjestelmässä esitetyt alustavat arvot).*

	Vesipitoisuuden raja-arvo, paino-%		
	Hyvin kuivatettu rakenne (alapinnan etäisyys kuivatus- tasosta tai pvp:stä yli 1,5 m)	Normaalisti kuivatettu rakenne (alapinnan etäisyys kuivatus- tasosta tai pvp:stä 0,8 - 1,5 m)	Huonosti kuivatettu rakenne (alapinnan etäisyys kuivatus- tasosta tai pvp:stä alle 0,8 m)
<b>Kantava,</b> murske (tai sora)	2	3	4
<b>Jakava,</b> murske tai sora	3	4	5
<b>Suodatin/eristys,</b> hiekkä tai sora	4	8	12

#### 4.2.1.2 Vaikutus pohjamaan urautumiseen roudan sulamiskautena

Pohjamaan urautumistarkasteluissa arvioidaan ilmasto- ja liikennekuormitusten aiheuttamia pysyviä eli plastisia muodonmuutoksia etenkin pohjamaassa. Urautuminen tapahtuu pääasiassa sulamiskaudella.

Sulavan maan vesipitoisuus riippuu routanousun suuruudesta (jään määrästä). Vaarallisin tilanne syntyy silloin, kun pohjamaa on yläosastaan sulanut ja jäästä vapautuneen sulamisveden kyllästävä. Suurimmillaan huokosveden ylipaine kyllästetyssä kerroksessa saattaa etenkin liikennekuormituksesta aiheutuvan jännityslisäyksen johdosta nousta valitsevan jännitystilän suuruiseksi. Tämän johdosta tehokas jännitys pienenee ja materiaalin kyky vastustaa muodonmuutoksia on hyvin alhainen. Sulamisveden purkautumiseen kuluva aika (sulamispehmenemiskauden pituus) riippuu mm. routanousun suuruudesta, routineen kerroksen paksuudesta ja vedenläpäisevyydestä sekä kuivatuksen tehokkuudesta. Jos roudan sulaessa



vapautuva vesi johdetaan tehokkaasti pois, vähenee sekä sulamispehmenemisen määrä että sen kesto aika.

Pohjamaan urautumistarkastelujen periaatteet on esitetty TPPT-suunnittelujärjestelmässä. Sulavan pohjamaan kantavuuden heikentyminen vaikuttaa myös yläpuolella olevien rakennekerrosten käyttäytymiseen, vaikka yläpuoliset kerrokset olisivatkin hyvälaatuisia ja normaaleissa vesipitoisuuksissaan, koska pohjamaan ja rakennekerrosten väliset jäykkyys-suhteet muuttuvat. Vetoa kestävämmästä materiaalista olevan kerroksen jäykkyysmoduuli riippuu myös alapuolella olevan kerroksen jäykkyyydestä. Lujuttaan menettäneen pohjamaan päällä oleva rakennekerros ei näin välttämättä pysty vastaanottamaan liikenteen kuormitusrasitusta, mikä johtaa pysyvien muodonmuutosten syntymiseen /5/.

#### 4.2.2 Muut rasitukset

##### Lämpötila

Lämpötilalla on suuri vaikutus tierakenteen kantavuuteen ja kokoaniskäyttäytymiseen. Tierakenteiden kantavuus on suurimmillaan talvella, kun rakennekerrokset ovat jäässä ja mahdollisesti vielä pohjamaakin on yläosastaan jäänyt. Tierakenteen kantavuus laskee yleensä alimmilleen keväällä sulamisaikana ja kohoaa tästä vähitellen normaaliin "kesäarvoonsa". Lämpötilan vaihtelulla 0 °C:n yläpuolella ei kuitenkaan ilmeisesti ole juurikaan vaikutusta karkearakeisten materiaalien muodonmuutuskäyttäytymiseen /8/. Kantavuus- ja käyttäytymismuutokset johtuvat pikemmin lämpötilamuutosten aiheuttamista kosteusolosuhteiden muutoksista sulavassa ja kuivavassa rakenteessa, johon kosteutta saattaa tulla vielä rakenteen ulkopuoleltakin. Päällysrakennekerroksissa tästä kostumisesta aiheutuva jäykkyyden aleneminen voi olla 10...15 % luokkaa.

##### Routaantuminen / routiminen, toistuva jäätyminen ja sulaminen

Pohjamaassa tapahtuvat epätasaiset routanousut (tai painuma) saattavat aiheuttaa myös ylempänä oleviin kerroksiin muodonmuutoksia, joiden johdosta kerrokset löyhtyvät. Tierakenteen hallitusta (sallittavasta) taipumisesta (painuma ja routanousu) aiheutuva sitomattomien kerrosten löyhtyminen on otettava tarvittaessa huomioon parametrien mitoitusarvoja määritettäessä. Painuma ja routanousu rajoittuvat kuitenkin muiden kriteerien perusteella yleensä sellaiselle tasolle, ettei löyhtyminen heikennä merkittävästi rakennetta. Normaalikäytännön mukaisia sitomattomia (routimattomia) materiaaleja ja rakenteita käytettäessä rakennekerrosten materiaalien routimisesta tai routaantumisesta ei pitäisi aiheutua rakennekerrosten merkittävää löyhtymistä.

Sitomattomien materiaalien toistuva jäätyminen ja sulaminen, saattaa rapauttaa materiaaleja ja edelleen aiheuttaa raekokojakautuman muuttumista ja hienoaaines- sekä savi-lajitepitoisuuden kasvua. Nämä molemmat vaikuttavat materiaalien jäykkyyttä eli moduulia alentavasti.



## 4.3 Sitomattomien materiaalien ominaisuudet

### 4.3.1 Tutkimusten tausta-aineisto

Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) oli, jo ennen materiaalitutkimusten aloittamista TPPT:ssä, suoritettu tierakenteiden sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuuksien selvittämiseen liittyviä kirjallisuusselvityksiä /5/ ja esiselvitysvaiheen kuormituskokeita /6/. Selvitykset oli tarkoitettu palvelemaan analyttisten mitoitusmenetelmien kehittämistä ja sitomattomien kerrosten kiviainekselle asetettavien laatuvaatimusten tarkistamista.

Kirjallisuusselvitykseen /5/ on kerätty karkearakeisilla materiaaleilla suoritettujen koesarjojen keskeisimmät tulokset ja pyritty esittämään ne keskenään mahdollisimman yhteismitallisina. Kirjallisuusselvityksessä referoiduissa kahdessa laajassa tutkimuksessa on esitetty K- $\theta$  -mallin mukaiset parametrit  $K_1$  ja  $K_2$  ja näiden pohjalta on tutkituille materiaaleille laskettu jäykkyyssmoduulien arvot muutamilla eri pääjännityssumman arvoilla. Kirjallisuusselvityksessä on esitetty tutkimustuloksia sekä palautuvien että palautumattomien muodonmuutosominaisuuksien osalta.

Esiselvitysvaiheessa /6/ kuormituskokeita tehtiin kolmella erityyppisellä kiviaineksella. Näistä yksi oli kallioista murskaamalla valmistettua materiaalia, yksi soramursketta ja yksi luonnonsoramateriaalia. Kullakin kiviaineksella, joiden kaikkien maksimiraekoko oli 55 mm, kuormituskokeet tehtiin

- suhteistuneella kantavan kerroksen ohjealueen mukaisella ja
- rakeisuuskäyrältään lajittuneelle materiaalille,

Tutkittujen näytteiden vesipitoisuutta vaihdeltiin täysin kuivan, kostean ja kokonaan veden kyllästämän tilan välillä. Kaikkiaan esiselvitysvaiheessa tukittiin 33 näytettä, näytemäärien painottuessa kalliomurskeeseen (21 näytettä; suhteistuneella 12, lajittuneella 9). Luonnonsorilla ja soramurskeilla tutkittiin kummallakin 6 näytettä (yksi lajittuneisuus / vesipitoisuus).

Selvityksen päätuloksena todettiin kaikilla tutkituilla materiaaleilla palautuvaa muodonmuutosta kuvaavan moduulin riippuvan voimakkaasti jännitystilasta. Suhteistuneilla murskatuilla kiviaineksilla korkeimmat jäykkyyssmoduulien arvot saatiin osittain veden kyllästämillä näytteillä, lajittuneilla kiviaineksilla puolestaan täysin kuivilla materiaaleilla. Luonnonsoranäytteiden jäykkyyssmoduulit olivat pääsääntöisesti jonkin verran vastaavia sora- ja kalliomurskenäytteiden arvoja alhaisemmat /6/.

TPPT:n materiaalitutkimuksissa /7/ suoritettiin edellä mainitun esiselvitysvaiheen kuormituskokeille täydentäviä kolmiakselikoesarjoja. Viitteessä /7/ esitetyistä 28 isomittakaavaisesta kokeesta 11 koetta tehtiin viidestä eri havaintotiekohteesta otetuille kantavan kerroksen murskeille ja 15 koetta kiviaineksille, joiden rakeisuusjakautumat oli suhteutettu tielaitoksen suunniteluohjeissa annettujen sitomattomien kerrosten materiaalien ohjealueita vastaaviksi. Lopuilla kokeilla selvitettiin näytekoon vaikutusta tuloksiin.

Havaintoteiden kantavan kerroksen murskeet pyrittiin testaamaan mahdollisimman tarkoin "luonnollisissa" vesipitoisuuksissaan ja tiheyksissään, kuitenkin siten, että yli 32 mm:n rakeet oli poistettu näytteistä. Myös muut materiaalit testattiin mahdollisimman hyvin käyttötilan vesipitoisuuksissa ja tiiviyksissä. Muut täydentävissä koesarjoissa testatut materiaalit olivat hiekka (yksi suodatin kerroksen ja yksi jakavan kerroksen hiekka), luonnonsora (neljä jakavan kerroksen soraa) ja kalliomurske (kaksi kantavan kerroksen kalliomursketta).

Yksi tutkimuksen tärkeimpiä tuloksia oli, että rakeisuusohjealueiden mukaisiksi suhteutetuilla materiaaleilla rakeisuusjakautumaan perustuva jäykkyysmoduulin arviointimenettely antoi periaatteessa laboratoriotutkimusten kanssa yhdenmukaisia tuloksia. Jäykkyysmoduulien vastaavuus edellyttää kuitenkin myös tierakenteessa liikennekuormitustilanteessa kohdistuvan jännitystilän huomioonottamista. Jäykkyysmoduulia ei siten voida arvioida pelkästään rakeisuuteen perustuen, mikäli materiaalin paikka tierakenteessa muuttuu tai rakenne muuten olennaisesti poikkeaa tavanomaisesta perinteisestä rakenteesta. Havaintoteiden näytemateriaaleilla keskeisimmäksi jäykkyysmoduulien eroja selittäväksi tekijäksi todettiin kiviaineksien tiiviytila /7/.

Tutkimusvälineenä on kaikissa edellä käsitellyissä tutkimuksissa käytetty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laitoksen dynaamista kolmiakselikoelaitteistoa, joka mahdollistaa halkaisijaltaan 300 mm:n ja korkeudeltaan 600 mm:n näytteiden koestamisen. Kiviainesten palautuvan muodonmuutoksen määrittämisessä on käytetty lähinnä amerikkalaisen SHRP-tutkimusohjelman mukaista kuormitustapasuositusta (etenkin esiselvitysvaiheen kokeet), mutta joissakin kokeissa myös CEN:n ja NGI:n ohjeiden mukaisia kuormitustapoja. Täydentävissä koesarjoissa käytettyjen näytteiden halkaisija oli pääosin 200 mm. Monille näytteille on tehty myös palautumatonta muodonmuutostäyttymistä testaavia koesarjoja ja staatisia kolmiakselikokeita.

TPPT:n materiaalitutkimusten päätavoitteena on ollut selvittää karkearaakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin keskeisemmin vaikuttavat muuttujat ja niiden merkitys. Lisäksi tavoitteena on ollut kehittää menettely, jonka avulla erilaisten kiviainesten jäykkyysmoduulit pystyttäisiin määrittämään käytännön tarpeisiin riittävällä tarkkuudella niiden laatua ja fyysikaalista tilaa kuvaavien, helposti mitattavissa olevien suureiden perusteella. Jäljempänä on käsitelty muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä näiden tutkimusten pohjalta.

On hyvä muistaa, että eri tekijöiden (muuttujien) vaikutukset materiaalin moduuliin eivät ole toisistaan riippumattomia. Materiaalien käyttäytymistä ei siten jatkossa esitetyn perusteella tule arvioida pelkästään esimerkiksi vesipitoisuuden muutosten perusteella, koska vesipitoisuuden muutoksella voi eri tyypisissä materiaaleissa olla esimerkiksi hienoaineksen määrästä johtuen erilainen vaikutus.



Jäljempänä on käsitelty materiaaleille tutkimuksissa määritettyjä parametreja ja koetulosaineiston pohjalta muodostettua kiviainesten jäykkyysmoduulin arviointimenettelyä. Arviointimenettelyn kehityksessä tausta-aineiston on muodostanut yli 130 kolmiakselikokeen tulokset. Tutkimusten pääpaino on ollut kalliomurskeissa, joilla tehtyjä kokeita on ollut n. 80 % kuormituskokeiden kokonaismäärästä /8/.

Näiden lisäksi on TPPT –projektin aikana TTKK:ssa tehty ainakin seuraavat tierakentamisen sitomattomiin materiaaleihin kohdistuneet tutkimukset ja selvitykset:

- Oulun alueen kantavan kerroksen ominaisuuksien tutkimus ja
- Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet –tutkimus.

Näistä ensimmäistä ei vielä ole raportoitu. Jälkimmäinen on raportoitu Tiehallinnon julkaisusarjassa /11/.

#### **4.3.2 Sitomattomiin materiaaleihin liittyviä ulkomaisia tutkimuksia**

TPPT:n toteutuksen kanssa samanaikaisesti on ollut käynnissä ainakin seuraavat sitomattomia tierakennusmateriaaleja sivuavat eurooppalaiset tutkimushankkeet:

- Cost 337 "Unbound Granular Materials for Road Pavements" /2/,
- Courage "Construction with Unbound Road Aggregates in Europe" /3/,
- Sintef'in tutkimus "Permanente deformasjoner i granulaere lag i dekkekonstruksjoner" /4/.

Myös Ruotsissa on tehty pohjamaan pysyviin muodonmuutoksiin liittyvää tutkimusta, jossa on tehty koetiekone- ja kolmiakselikokeita /10/.

Cost 337 on lähinnä kirjoituspöytätyönä tehty yhteenveto tierakenteen toiminnallisista vaatimuksista, sitomattomien luonnonkiviainesten ja uusiotuotteiden käytettävyydestä tierakenteessa, tuotantotekniikoista, testausmenetelmistä, materiaalien mallinnuksesta, mallien toiminnan verifioimisesta, teknisistä toteutusohjeista sekä jatkotutkimustarpeista. Cost 337-hanke on jo loppunut ja raportit ovat tätä raporttia laadittaessa painossa. Tutkimusten tulokset ovat tässä vaiheessa saatavissa lähinnä luonnosversiovaiheen raporteista.

Cost 337:n raportissa todetaan, että "Sitomattomille materiaaleille asetettavat vaatimukset tulisi määrittää käyttäen perustavaa laatua olevaa tietämystä geoteknisten periaatteiden mukaisesta materiaalin käyttäytymisestä ja kuorman vaikutuksesta rakenteen vasteeseen. Analyttinen suunnittelu-käytäntö tuottaa sopivan ympäristön kyseisten periaatteiden hyödyntämiseen".

Cost 337:n toteutuksen aikana havaittiin, että yleisimmät tunnetut konstitutiiviset mallit eivät täysin pystyneet selittämään rakenteen palautuvia muo-



donmuutoksia. Projektin ohessa kehitettiin uusi malli ("Anisotropic Boyce"), joka osoittautui tarkoitukseen hyvin soveltuvaksi. Uusien mallien soveltamiseen tarvitaan aina elementtimenetelmään perustuvat ohjelmat.

Materiaalin pysyvä muodonmuutos –käyttäytymisen muuttamista konstitutiivisiksi yhtälöiksi tai analyttisiksi laskentamenetelmiksi todettiin paljon vaikeammaksi, eikä mitään erityistä edistymistä toteutunut projektin aikana.

Raportissa esitetään erilaisia päättely-puu rakenteita, joita voidaan käyttää valittaessa materiaaleja tiettyyn rakennekerrokseen tai rakennekerrossovellutusta tunnetulle materiaalille.

Courage -projekti sisältää kokeellista maasto- ja laboratoriotutkimusta seuraavilta osa-alueilta: kosteuden vaihtelu tierakenteessa ja sitomattomien materiaalien indeksi- ja kolmiakselikokeita. Lisäksi on tehty materiaalien ja koeratakokeiden tulosten mallinnusta.

Myös Courage -projekti on jo loppunut ja raportit ovat tätä raporttia laadittaessa painossa.

Sintef'in tutkimuksessa kehitettiin laboratoriokoetekniikkaa ja materiaalmalleja tiemateriaalien pysyvien muodonmuutosten mallintamiseksi kuormitustason ja kuormituskertojen mukaan. Myös TTKK teki tutkimusta samaan KPG -projektiin. Sintef'in hankkeen raportti valmistui vuoden 2000 keväällä.

Ruotsissa tehty pohjamaan pysyviin muodonmuutoksiin liittyvässä tutkimuksessa tutkittiin silttiä, silttistä hiekkaa, tasarakeista hiekkaa sekä savimorreenia. Tutkimustuloksia oli koottu sekä CRELL:n että VTI:n HVS -kokeista sekä KTH:llä tehdyistä kolmiakselikokeista.

Seuraavassa on lyhyesti esitetty eräitä em. ulkomaisissa projekteissa esille tulleita sitomattomien materiaalien käyttäytymiseen vaikuttavia asioita.

#### Palautuva muodonmuutos

Palautuviin muodonmuutoksiin, eli elastiseen käyttäytymiseen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- jännitystaso, -historia
- tiheys
- kosteuspitoisuus
- rakeisuus ja kiviainestyyppi

Edellä mainittujen tekijöiden vaikutus on kiistämätön. Vaikutuksen suuruus vaihtelee materiaalien (kivilajin), olosuhteiden ja käytettyjen koemenetelmien mukaan.

### Pysyvä muodonmuutos

Pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavat seuraavat tekijät (Cost 337 /2/):

- jännitystaso
- pääjännitysten kiertyminen
- kuormitus syklien määrä
- kosteuspitoisuus
- jännityshistoria
- tiheys
- rakeisuus ja kiviainestyyppi
- lämpötila

Laajemmin ulkomaisten tutkimusten tuloksia on referoitu myös viitteessä /12/ Juvankoski, M. ja Laaksonen, R. Sitomattomat tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalien käyttäytymisestä. TPPT Työraportti 2001

### **4.3.3 Muodonmuutosominaisuuksiin vaikuttavat tekijät**

#### **4.3.3.1 Rakeisuusmuuttujat**

Rakeisuusmuuttujien, kuten esim. rakeisuuskäyrän muodon huomattavat vaikutukset materiaalin moduuliin käyvät ilmi jo kauan tielaitoksella käytössä olleessa rakeisuuskäyriin pohjautuvassa moduulien arviointimenettelyssä. Eri tekijöiden vaikutukset materiaalin jäykkyyteen eivät kuitenkaan välttämättä ole aivan niin yksiselitteisiä kuin tielaitoksen arviointimenettely antaa ymmärtää. Eri tekijöiden vaikutukset ovat moninaisessa keskinäisessä riippuvuussuhteessa toistensa kanssa. Eri tekijöiden vaikutusten "suuret linjat" ovat usein saman suuntaisia eri tyyppisilläkin materiaaleilla. Esimerkiksi kyllästyneessä tilassa jäykkyyshmoduuli on yleensä pienempi kuin kuivassa tilassa. Erot ja vaikutukset rakeisuusmuuttujiltaan erilaisten materiaalityyppien käyttäytymisessä käytännön rakenteissa vaikuttavissa vesipitoisuuksissa voivat kuitenkin olla eri hyvinkin erilaisia. Erot eivät välttämättä aina kaikilta osiltaan ole edes saman suuntaisia, koska muutkin tekijät (rakeiden ominaisuudet, tiivistila, jne.) vaikuttavat materiaalin käyttäytymiseen.

#### Raekokojakautuma

Rakeisuuskäyrän muoto (materiaalin raekokojakautuma) määrää pitkälti sen, minkä kokoisten rakeiden muodostaman raerungon kautta kuormitus maamateriaalissa välittyy. Fullerin käyrän mukaisissa materiaaleissa kaikki raekoot osallistuvat parhaiten kuormituksen jakamiseen. Mikäli materiaalissa on enemmän karkeitä rakeita eli rakeisuuskäyrä on roikkuva, karkeampi kiviaines toimii kantavana rakenteena ja hienoaines saattaa olla hyvin löyhänä karkeampien rakeiden välissä. Tästä syystä myös materiaalin tiheys jää yleensä alhaisemmaksi, kuin mihin rakeisuusjakautumaltaan suhteistuneempi materiaali pystyttäisiin samalla työmäärällä tiivistämään. Vaikka rakeisuuskäyrältään roikkuvaksi lajittuneen kiviaineksen raerungon voisi olettaa harvempien raekontaktiensa vuoksi olevan jäykemmän kuin vastaavan



tiheyden omaavan suhteistuneen materiaalin, saavuttaa suhteistunut materiaali samalla tiivistystyömäärällä selvästi korkeamman tiheyden ja oletta-  
vasti näin saavuttaa myös suuremman jäykkyyden. Tämän suuntaisia ha-  
vaintoja on tehty myös kalliomurskeiden koekuormituksissa /8/.

Osittain raekoostumuksesta riippuvan tiheyden ohella on muistettava myös mm. vesipitoisuuden ja muiden tekijöiden, esim. kivilajin, vaikutus materiaa-  
lin ominaisuuksiin. Kirjallisuustutkimuksessa /5/ kuivalla dolomiittikalkkiki-  
vellä paras kyky vastustaa palautuvia muodonmuutoksia saavutettiin lajittu-  
neimman rakeisuuden omaavilla näytteillä. Samalla tiivistystyöllä saavute-  
tusta suuremmasta tiheydestä huolimatta hienomman aineksen lisääminen  
karkearakeisen kiviaineksen huokostilan täytteeksi ei kuitenkaan parantanut  
palautuvan muodonmuutoksen moduulia, vaan päinvastoin alensi sitä. Sa-  
man suuntaiseen tulokseen päädyttiin myös esiselvitysvaiheen /6/ kuivan  
murskatun kiviaineksen kuormituskokeissa. Osittain veden kyllästämillä  
materiaaleilla tilanne on kuitenkin toinen mm. näennäisestä koheesiosta  
johtuen.

Mikäli rakeisuuskäyrän muoto muuttuu pakkautumisen kannalta optimaali-  
seen käyrämuotoon nähden niin, että keskikarkeat lajitteet ovat yliedustet-  
tuina (ns. hiekkapatti), moduuli alenee, koska tasarakeinen materiaali ei  
suuremmissa huokosissa tiivisty yhtä hyvin kuin kauttaaltaan suhteistunut  
materiaali. Karkeimmat rakeet saattavat äärimmillään irrota toisistaan koko-  
naan /8/ ja olla hienomman aineksen sisällä.

#### Maksimiraekoko

Kirjallisuustutkimuksen /5/ mukaan materiaalin maksimiraekoko vaikuttaa  
erittäin merkittävästi materiaalin jäykkyyshuokosmoduulin palautuvaan muodon-  
muutoskäyttäytymiseen. Maksimiraekoon pienentyminen alentaa jäykkyyshuokos-  
moduulin arvoa. Esim. dolomiittikalkilla palautuva leikkausmuodonmuutos  
50 kPa:n sellipaineella on suhteellisen maksimiraekoon puolittuessa kasva-  
nut arvosta ~0.3 % arvoon ~0.5 % ja maksimiraekoon edelleen puolittuessa  
arvoon ~0.7 %, kun deviatorinen jännitys on ollut 0...100 kPa. Suurem-  
malla deviatorisella jännitysvälillä (0...200 kPa) palautuva leikkausmuodon-  
muutos on vastaavasti kasvanut arvosta ~0.6 % arvoihin ~1.6 % ja ~2.5 %  
/5/.

Maksimiraekoon vaikutus moduuliin tulee huomioida laboratoriossa suori-  
tettavissa moduulimäärityksissä. Materiaalin rakeisuutta koetta varten  
skaalaamalla (pienentämällä maksimiraekokoa, mutta pitämällä raekäyrän  
muoto entisellään) hyvin karkearakeisen materiaalin moduulia ei voida luot-  
tettavasti määrittää. Testaus tulee tehdä aina rakeisuudeltaan mahdolli-  
simman lähellä todellista, käytettävää materiaalia olevilla näytteillä /5/.

Maksimiraekoon vaikutusta on selvitetty dynaamisella kolmiakselikokeella ja  
syklisellä levykuormituskokeella. Kolmiakselikokeissa näytteiden rakeisuuk-  
sien erot olivat niin vähäisiä, ettei selkeitä riippuvuuksia saatu esille. Sykli-  
sissä levykuormituskokeissa raekoon kasvaminen 20 mm:stä 55 mm:iin on  
suurentanut levykuormituskokeen moduulin jopa nelinkertaiseksi /5/. Kar-



kearakeisen materiaalin hyvät muodonmuutosominaisuudet johtuvat todennäköisesti muodonmuutosten keskittymisestä harvalukuisempiin raekontakteihin kuin hienorakeisemmassa materiaalissa /8/.

#### Hienoainespitoisuus

Kirjallisuustutkimuksen /5/ mukaan hienoainespitoisuuden (lajite < # 0.074 mm) vaikutus materiaalin moduuliin ei ole yksikäsitteinen. Mikäli materiaalissa on hienoainesta kohtuullisen vähän, pääsevät materiaalin karkeammat rakeet toistensa kanssa suoraan kosketukseen ja kuorma välittyy niiden muodostaman raerungon kautta. Hienoainemäärän kasvaessa kaikki hienorakeisempi materiaali ei enää välttämättä mahdu karkeampien rakeiden väliin tyhjätiloihin, minkä seurauksena karkeammat rakeet saattavat menettää suoran kosketuksen toisiinsa /8/.

Hienoainespitoisuus saattaa vaikuttaa materiaalin laadusta riippuen moduulin laskentakaavassa (2) olevien kertoimien  $K_1$  ja  $K_2$  arvoihin. Murskatuilla kiviaineksilla hienoainemäärän vaikutus näihin kertoimiin on vaihteleva ja ylipäättään vähäinen. Soramurskeella kerroin  $K_1$  saavuttaa maksimiarvonsa n. 10 % hienoainespitoisuudella, minkä jälkeen se pienenee hienoainespitoisuuden kasvaessa, jolloin muodonmuutoskäyttäytymisen jännitystilariippuvuus voimistuu.

Kirjallisuustutkimuksen johtopäätöksenä on esitetty hiekan ja soramateriaalien jäykkyysmoduulien olevan herkempiä hienoainespitoisuuden vaihteluille kuin vastaavan raekoostumuksen omaavien murskattujen ja kulmikkaista rakeista koostuvien materiaalien moduulien. Yleisesti ottaen hienoainemäärän kasvun otaksutaan alentavan jäykkyysmoduulia. Koekuormituksissa lajittuneella Sievin kalliomurskeella n. 10 % hienoainemäärä aiheutti suuruusluokaltaan 15 % alentumisen jäykkyysmoduuliin /8/ verrattuna hienoaineksesta puhtaan murskeen moduuliin.

Hienoaineksen määrän ohella myös hienoaineksen laatu vaikuttaa materiaalin muodonmuutoskäyttäytymiseen. Mitä aktiivisemmin ja runsaammin hienoaines sitoo vettä itseensä, sitä suuremmaksi kasvaa riski moduulin alentumiseen. Vesi toimii sekä suoraanaisesti liukastusaineena rakeiden pinnalla. Myös huokosveden ylipaineen kehittymismahdollisuus lisää moduulin alenemisen riskiä /8/.

Kirjallisuustutkimuksen /5/ mukaan myös savipitoisuuden (lajite < # 0.002 mm) kasvulla näyttäisi olevan jäykkyysmoduulia alentava vaikutus, joskin sen merkitys näyttäisi olevan sidoksissa myös materiaalin vesipitoisuuteen. Esimerkiksi savipitoisuuden kasvu 0.4 %:sta hieman yli 2 %:iin näyttäisi alentavan moduulia 15...20 % (kyllästynyt / w=4.5 %). Pienillä vesipitoisuuksilla (w=2.0 %) ja savipitoisuuksilla (0.4...1.0 %) moduulin arvo saattaa tosin kasvaakin hieman. Vaikutuksen on arveltu olevan riippuvainen myös savilajitteen mineralogisesta koostumuksesta /5/.

Karkearakeisen materiaalin jäykkyysmoduulin alentumisesta sekä myös materiaalin vedenläpäisevyyden pienenemisestä johtuen on savipitoisuuden suositeltavaksi enimmäismääräksi esitetty 1...2 % /5/.

Jäykkyysmoduulin arviointimenettelyssä eri rakeisuusmuuttujat tulevat huomioiduksi jäljempänä esitettyjen riippuvuussuhteiden (kaavat 5-7) kertoimissa  $a_1$  ja  $a_2$ . Rakeisuusmuuttujien vahvaa osuutta moduulin määräytymisessä kuvaa se, että pääosalla materiaalitutkimusten tausta-aineistona olevista kiviaineksista näille parametreille näyttäisi olevan mahdollista saada hyvä likiarvo pelkästään rakeisuuskäyrän muotoon (ekvivalenttiin raekoon) perustuvan tarkastelun avulla /8/.

#### 4.3.3.2 Kosteustila

Kosteustilan vaikutus karkearakeisten materiaalien muodonmuutosominaisuuksiin on selvä. Vaikutuksen suuruus ja suunta riippuvat kuitenkin sekä materiaalityypistä että kosteuden määrästä. Osittain kyllästyneillä suhteistuneilla materiaaleilla kosteus kasvattaa palautuvien muodonmuutosominaisuuksien muodonmuutosmoduulia. Tämä johtuu osittain veden kyllästämisestä huokosissa vaikuttavasta pintajännityksestä (näennäinen koheesio), joka painaa maarakeita toisiaan vasten. Tämän vaikutuksen suuruus riippuu maamateriaalin keskimääräisestä rae- / huokoskoosta ja veden määrästä sekä kiviaineksen pintaominaisuuksien ja veden välisestä vuorovaikutuksesta. Runsaasti hienoainesta sisältävillä ja tiiviisti pakkautuvilla materiaaleilla kosteustilan vaikutus on suurempi. Näennäisestä koheesiosta aiheutuvaksi on tulkittu myös alhaisilla vesipitoisuuksilla karkearakeisella kalliomurskeella (0...40 mm) havaitut melko suuret moduulin erot. Eräällä kalliomurskeella vesipitoisuuden kasvu 0.7 %:sta 1.8 %:iin aiheutti jakavassa ja kantavassa kerroksessa tyypillisesti esiintyvällä pääjännitysten summan alueella moduulin alentumisen noin puoleen /5/.

Kuten edellä esitetystä on havaittavissa on vesipitoisuuden vaikutus materiaalin palautuvaan jäykkyysmoduulin edullinen vain suhteellisen alhaisilla vesipitoisuuden arvoilla. Vesipitoisuuden (kyllästysasteen) kasvaessa yhä suurempi osa huokosista täyttyy vedellä ja näennäisen koheesion vaikutus lakkaa kokonaan, kun materiaali on veden kyllästämää. Suuremmilla vesipitoisuuksilla ( $S_r = 20...100$  %) useita rakeisia materiaalityyppejä sisältävässä koeaineistossa sekä kertoimen  $K_1$  että moduulin on havaittu alentuvan kyllästysasteen kasvaessa. Kertoimen  $K_2$  arvoon kyllästysasteella ei havaittu olevan yksikäsitteistä vaikutusta. Materiaalin ollessa lopulta kokonaan kyllästynyttä, tehokkaiden jännitysten periaatteiden mukaisesti heikkenee sen kyky vastustaa sekä palautuvia että palautumattomia muodonmuutoksia. Palautumattomien muodonmuutosten kriittisenä kyllästysasteen rajana pidetään sorilla ja murskeilla 80...85 %, jonka jälkeen palautumattomien muodonmuutosten lisääntymisriski kasvaa voimakkaasti.

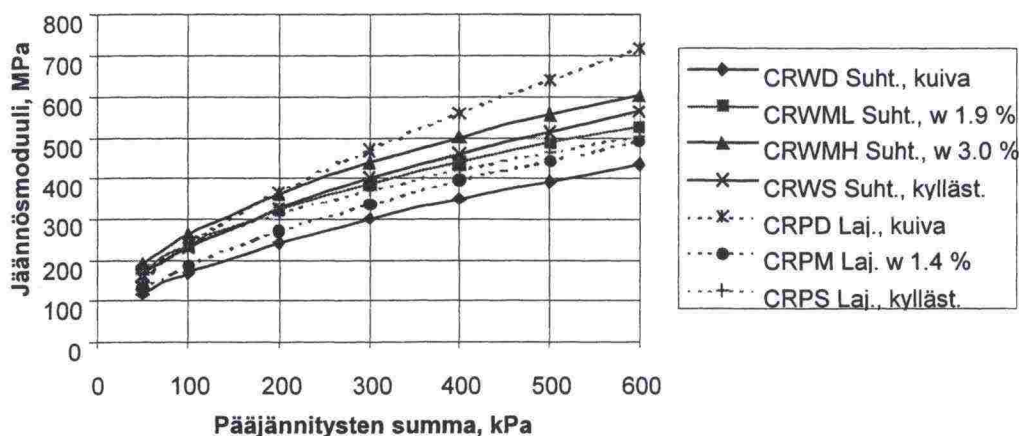
Kirjallisuusselvityksen /5/ yhteenvedona herkkyyys materiaalin kosteuspitoisuuden vaihteluille on todettu olevan suurin pyöristyneillä, murskaantumattomilla rakeilla ja vähäisempi murskatulla kiviaineksella.



Kuormituskokeissa /6/ palautuvan muodonmuutoksen moduuli suhteistuneella kalliomurskeella kasvoi selvästi näytteen kosteuspitoisuuden kasvaessa täysin kuivasta tilasta noin 30 %:n kyllästysasteeseen ( $w \sim 3\%$ ). Täysin veden kyllästämillä näytteillä moduuliarvot kuitenkin pienenevät jälleen ja vastasivat suunnilleen vajaan 20 %:n kyllästysasteessa ( $w \sim 1.9\%$ ) tutkituille näytteille määritettyjä arvoja. Kosteustilan vaikutus koemateriaalin käyttäytymiseen on esitetty kuvassa 4.

Lajittuneella kalliomurskeella saadut tulokset poikkesivat merkittävästi suhteistuneella kalliomurskeella saaduista tuloksista. Lajittuneella kalliomurskeella suurimmat jäykkyyssmoduulin arvot saatiin kuivilla näytteillä ja alhaisimmat kosteana kuormitetuilla näytteillä. Täysin kyllästyneenä saadut moduulin arvot olivat vain hieman suurempia kuin kosteana tutkituilla näytteillä (kuva 4).

#### Suhteistunut ja lajittunut kalliomurske

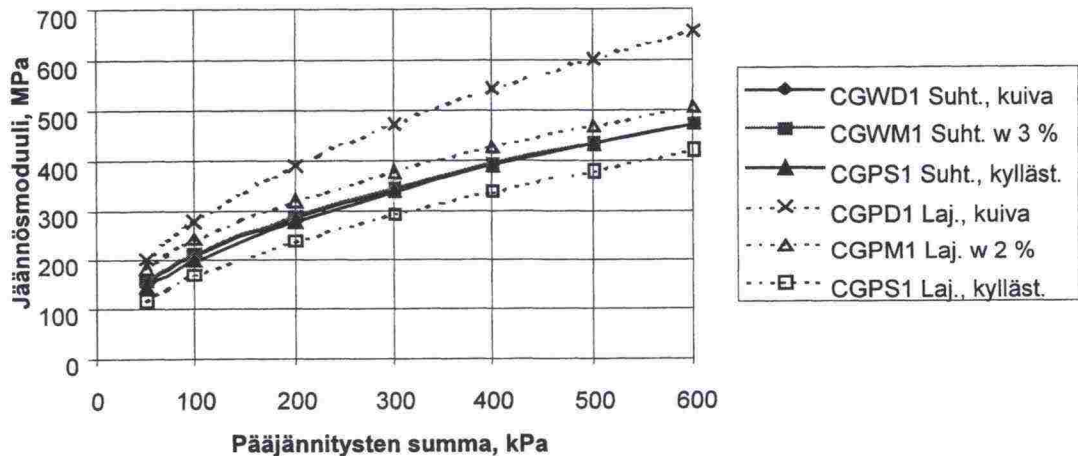


Kuva 4. Vesipitoisuuden vaikutus suhteistuneen ja lajittuneen kalliomurskeen jäykkyyssmoduuliin (kuvassa jäännösmoduuli). Esiselvitysvaiheen kuormituskokeiden tulokset  $K-\theta$  - mallilla pääjännitysvälille 50...600 kPa piirrettynä ko. viitteessä esitetyillä mallin parametreilla, näytetunnuksia ja -tietoja käyttäen /6/.

Suhteistuneessa soramurskeessa vesipitoisuuden vaihtelulla oli melko vähäinen vaikutus moduuliin. Lajittuneella soramurskeella vesipitoisuuden kasvu sen sijaan näytti alentavan moduulia lähes kautta linjan pääjännityksen summasta riippumatta (kuva 5).



### Soramurskenäytteet

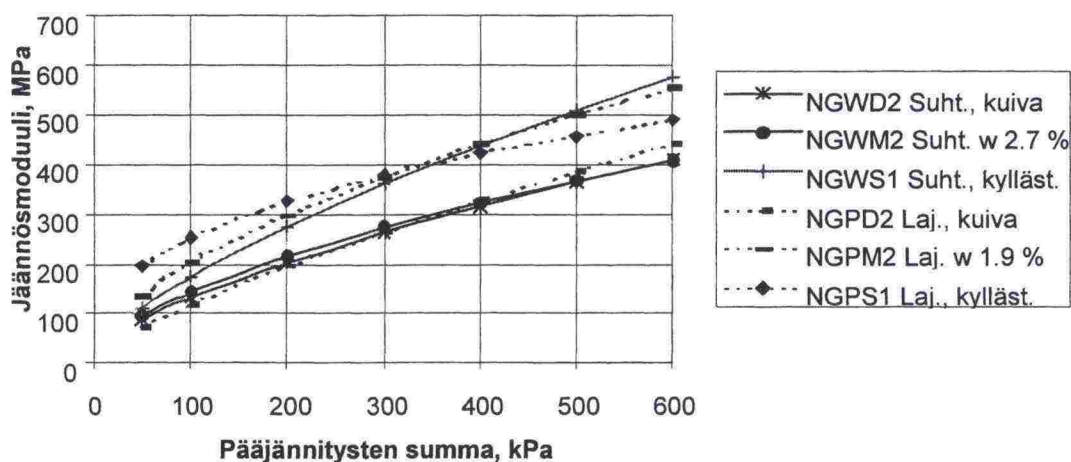


Kuva 5. Vesipitoisuuden vaikutus suhteistuneen ja lajittuneen soramurskeen jäykkyysmoduuliin (kuvassa jäännösmoduuli). Esiselvitysvaiheen kuormituskokeiden tulokset  $K-\theta$ -mallilla pääjännitysvälille 50...600 kPa piirrettynä ko. viitteessä esitettyjä mallin parametreja, näytetunnuksia ja -tietoja käyttäen /6/.

Kalliomurskeissa kosteustilan vaikutus jäykkyysmoduulin riippui selvästi näytteen raekokojakautumasta. Suhteistuneessa materiaalissa moduuli kasvoi aluksi vesipitoisuuden kasvaessa ja lajittuneessa materiaalissa vaikutus oli päinvastainen. Kalliomurskeissa moduulien erot eri kosteuspitoisuuksien välillä eivät olleet kuitenkaan kovin merkittäviä. Soramurskeissa suhteistuneissa materiaaleissa kosteuspitoisuuden aiheuttamat moduulien erot olivat pienemmät ja lajittuneessa materiaalissa suuremmat /6/.

Suhteistuneella luonnonsoralla ja lajittuneella luonnonsoralla koeohjelmassa tehtiin vain yksi koe, joten pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei näiden osalta ole tehty. Vesipitoisuuden kasvaessa moduulit pikemminkin näyttivät kasvaneen kuin alentuneen. Myös pääjännitysten summa näyttää vaikuttavan eri tavalla eri materiaaleissa (kuva 6).

## Luonnonsoranäytteet



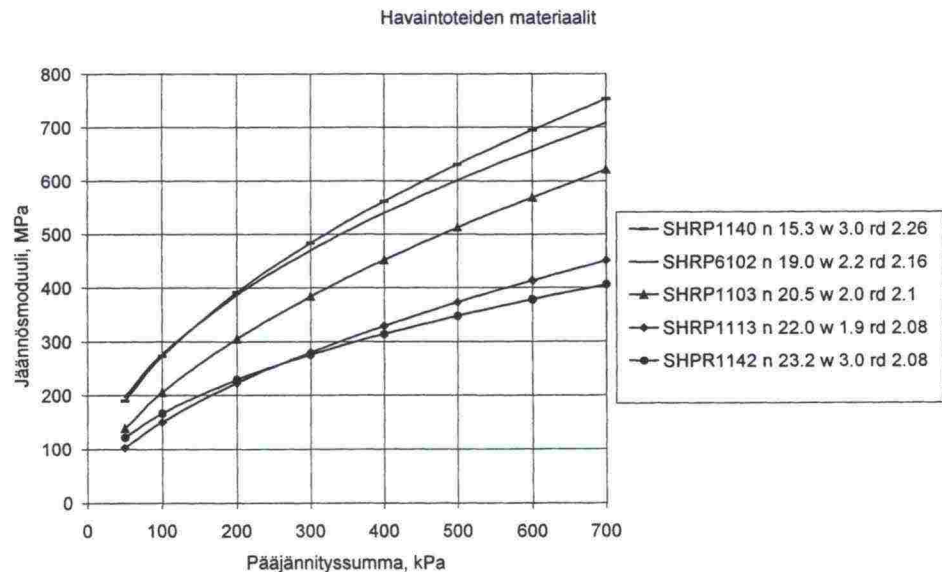
Kuva 6. Vesipitoisuuden vaikutus suhteistuneen ja lajittuneen luonnonsoran jäykkyysmoduuliin (kuvassa jäännösmoduuli). Esiselvitysvaiheen kuormituskokeiden tulokset  $K-\theta$  - mallilla pääjännitysvälille 50...600 kPa piirrettynä ko. viitteessä esitettyjä mallin parametreja, näytetunnuksia ja -tietoja käyttäen /6/.

Edellä esitettyjen havaintojen perusteella vesipitoisuuden vaihtelu ääriarvojensa välillä (kuiva - kyllästynyt) saattaa vaikuttaa materiaalin moduuliin jopa lähes 50 %. Vaikutuksen suuruus ja suunta vaihtelevat kuitenkin materiaalista ja sen rakeisuusjakautumasta riippuen. Pienimmillään vesipitoisuuden vaikutukset moduuliin näyttäisivät olevan suhteistuneessa soramurskeessa. Lajittuneessa soramurskeessa vaihtelut olivat puolestaan suuret ja vesipitoisuuden kasvattaminen alensi moduulia n. 40 %. Lajittuneessa kalliomurskeessa vesipitoisuuden kasvu kuivasta kosteaan ja kyllästyneeseen tilaan alensi moduulia noin 25 % ja suhteistuneessa kalliomurskeessa vesipitoisuuden nousu puolestaan nosti moduulin arvoa n. 30 % ( $w \sim 2$  % tai kyllästynyt) tai hieman enemmänkin ( $w \sim 3$  %).

Rakeisuusjakautuman vaikutukset moduuliin näyttäisivät kuitenkin pienentyvän merkittävästi, kun vesipitoisuus lähenee käytännön rakenteissa yleensä olevia vesipitoisuuksia. Täysin kuivien materiaalien ja toisaalta täysin kyllästyneiden materiaalien esiintyminen tierakenteissa on harvinaista. Tilannetta, jossa ylemmät rakennekerrokset ovat kyllästyneet, ei saisi päästä syntymään lainkaan. Täysin veden kyllästävässä materiaalissa huokosveden ylipaineen  $\Delta u$  (= funktio materiaalista, rakenteesta, veden pinnan tasosta, kuormituksesta) vaikutus voidaan ottaa huomioon pienentämällä pääjännitysten summaa arvolla  $\Delta\theta = 3 \cdot \Delta u / 8$ .

#### 4.3.3.3 Tiiviystila

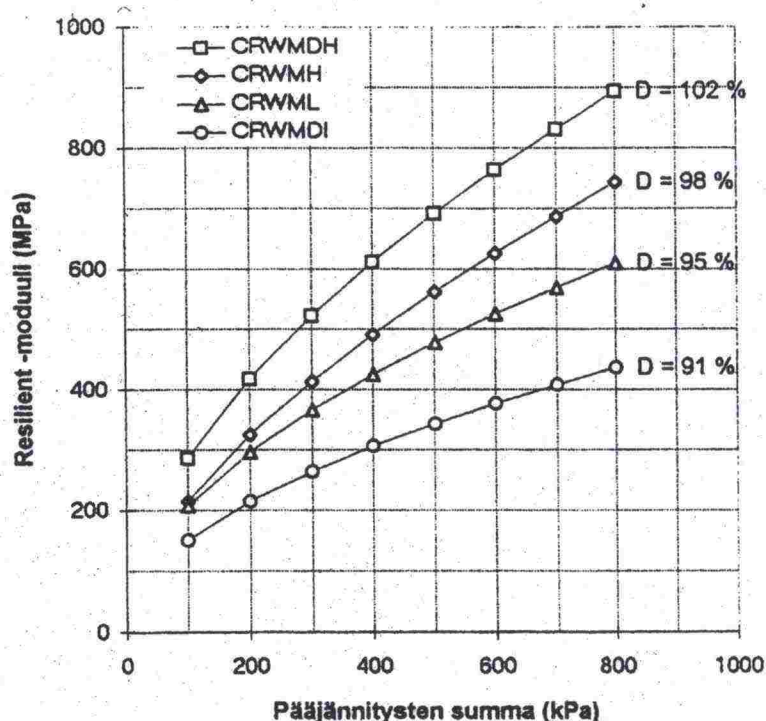
Materiaalin tiiviystila (tilavuuspaino, tiheys) on yksi tärkeimpiä karkearakeisen materiaalin jäykkyysmoduuliin vaikuttavista tekijöistä. Tutkittujen havaintoteiden /8/ kantavan kerroksen näytemateriaalien moduulit olivat suurimmilla tilavuuspainoilla lähes kaksinkertaisia pienen tilavuuspainon omaavilla näytteillä saavutettuihin moduuleihin nähden. Havaintoteiden materiaalien moduulit on esitetty kuvassa 7. Kuvasta voidaan havaita arvojen asetuvan kuivairtitiheyksien mukaiseen järjestykseen, vaikka suhteet eivät lähtöaineistosta johtuen olekaan täysin selkeät /8/. Vesipitoisuuksiltaan ja rakeisuuksiltaan materiaalit poikkesivat melko vähän toisistaan. Havaintoteiden materiaalien rakeisuudet on esitetty liitteessä 1.



Kuva 7. Havaintotiemateriaaleille määritetyt jäykkyysmoduulit (kuvassa jäännösmoduuli); selitteessä näytetunnuksen ohella näytteen huokoisuus  $n$ , %, vesipitoisuus  $w$ , % ja kuivairtitiheys  $rd$ ,  $t/m^3$  /8/.

Vielä selvemmin tiiviystilan vaikutus on havaittavissa kuvasta 8, jossa on esitetty tiiviystilan vaikutus suhteistuneen kalliomurskeen jäykkyysmoduuliin. Tässäkin samalle materiaalille löyhässä ja tiiviissä tilassa mitattujen moduulien ero on suuruusluokaltaan jopa 100 % /8/.





Kuva 8. Tiiviystilan vaikutus suhteistuneen kalliomurskeen jäykkyysmoduuliin (kuvassa Resilient – moduuli) /8/.

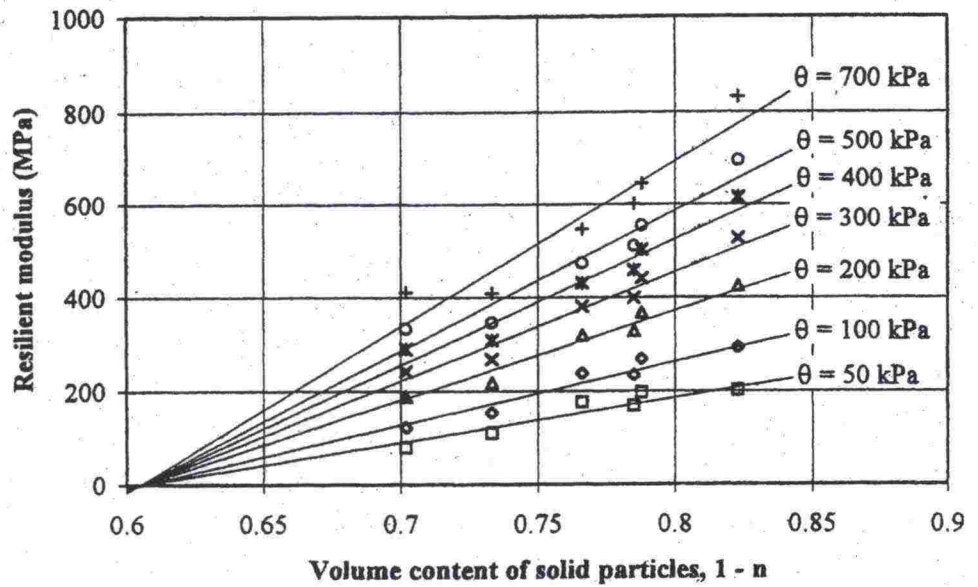
Koska tiiviystilan vaikutus moduuliin on näin merkittävä, on se sisällytetty myös kehitettyyn moduulin arviointimenettelyyn (kaavat 5-9). Näytteen tiiviystilaa kuvaamaan on valittu materiaalin huokoisuus /9/.

TPPT:n tutkimuksissa tiiviystilan vaikutuksen selvittämisen tausta-aineistona ja arviointimallin kehittämisen pohjana oli Sievin rakeisuudeltaan 0/55 mm olevat suhteistuneet ja lajittuneet kalliomurskeet. Suhteistunutta materiaalia testattiin viidessä eri tiiviyydessä materiaalin ollessa osittain kyllästettyä (kylästysaste  $S_r = 13...34\%$ ) ja yhdessä tiiviyydessä täysin kuivana ja toisaalta lähes kokonaan veden kyllästämänä. Lajittuneena materiaalia testattiin neljässä eri kyllästysasteessa ( $S_r = 13...34\%$ ) sekä myös kuivana ja kyllästettynä.

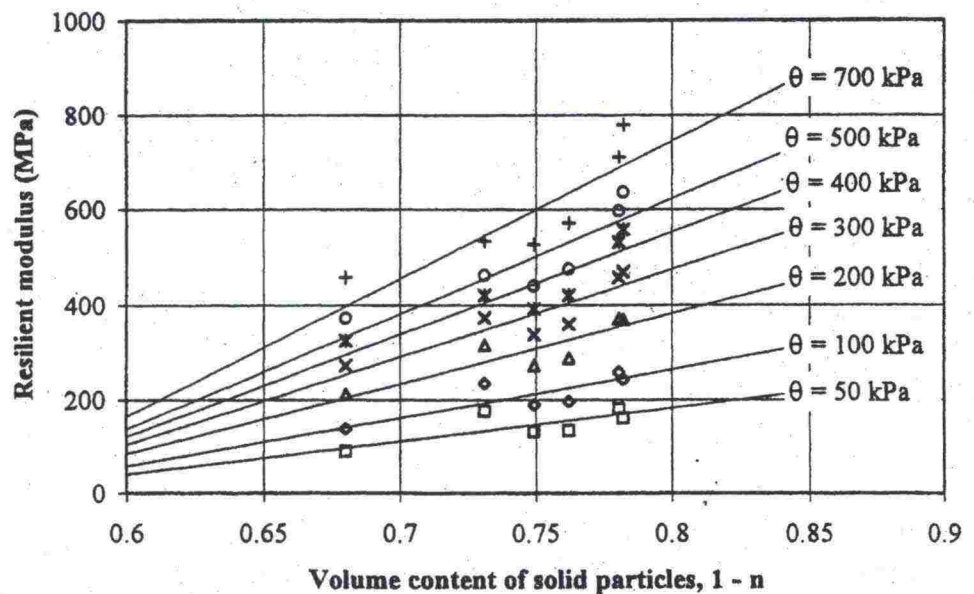
Eri tiiviystiloissa osittain kyllästyneelle ja lähes täysin kyllästyneelle suhteistuneelle Sievin kalliomurskeelle koetulosten perusteella lasketut moduulin arvot sekä näihin havaintoihin sijoitetut regressiosuorat kiintoaineen tilavuusosuuden  $(1-n)$  funktiona on esitetty kuvassa 9. Täysin kuivan materiaalin koetuloksia ei näytteen lajittumisesta ja siitä johtuvista tulosten poikkeamista johtuen ole sisällytetty kuvaan /9/. Kuvassa 10 on esitetty vastaavat tarkastelun tulokset lajittuneelle Sievin kalliomurskeella. Kuvista voidaan havaita, että tiiviystilan vaikutus moduulin arvoon on molemmilla materiaaleilla selvä. Yksittäisten näytesarjojen poikkeamat yleislinjasta ovat lajittuneessa materiaalissa jonkin verran suuremmat kuin suhteistuneessa mate-

riaalissa pääasiassa näyttemateriaalin karkeammasta rakeisuudesta johtuen /8/.

Suhteistuneelle kalliomurskeelle (rakeisuus T5) määritetyt maksimihuokoi-  
suuden arvot ovat  $n_{\max}=0.426$  ja lajittuneelle (rakeisuus T6)  $n_{\max}=0.430$  /9/.



Kuva 9. Osittain kyllästyneen ja lähes kyllästyneen suhteistuneen Sievin kalliomurskeen moduulit (kuvassa Resilient modulus) eri tiivystiloissa /9/.



Kuva 10. Lajittuneen Sievin kalliomurskeen moduulit (kuvassa Resilient modulus) eri tiivystiloissa /9/.



#### 4.3.3.4 Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet ja kiviaineksen mineraloginen koostumus

##### Raemuoto ja pinnan karkeus

Raemuotoa kuvataan yleensä ns. muotoarvon avulla. Materiaalin muodonmuutuskäyttämisen kannalta raemuodolla on merkitystä erityisesti pysyviin muodonmuutosominaisuuksiin erimuotoisten rakeiden toisistaan poikkeavan tiivistettävyyden kautta. Rakeiden puikkoisuus ja liuskeisuus voivat myös kasvattaa rakeiden murtumisesta johtuen materiaalin palautumatonta muodonmuutosta erityisesti silloin, kun epäedulliseen raemuotoon yhdistyy alhainen kiviaineksen lujuus /5/.

Myös rakeiden murtopintaisuudella on todettu olevan merkittävä vaikutus palautumattomiin muodonmuutoksiin. Rakeiden pinnan karkeuden kasvaessa kasvaa myös materiaalin kyky vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia /5/.

Raemuodon ja rakeiden pinnankarkeuden vaikutusta muodonmuutuskäyttämiseen ei kuitenkaan ole laajasti tutkittu. Käytännössä hyväksyttävillä materiaaleilla sen vaikutuksen on arveltu myös olevan niin vähäinen, että sen erottaminen muiden tekijöiden vaikutuksesta on vaikeaa. Huomattavasti merkittävämmän raemuoto vaikuttaa ilmeisesti epäsuorasti materiaalin tiivistilän kautta, koska raemuodolla on yleensä todettu olevan selvä vaikutus materiaalin tiivistyvyyteen /8/.

##### Rakeiden pintakitka

Rakeiden pinnan mikrokärkeutta kuvaavalla pintakitkalla puolestaan näyttäisi olevan jonkinlainen yhteys myös materiaalin palautuvaa muodonmuutosta kuvaavan moduuliin. Lähinnä rakeiden mineralogiasta riippuva pintakitka ei välttämättä kuitenkaan korreloi silmämääräisesti havaittavissa olevan rakeiden pinnan karkeuden kanssa /5/. Myöskään raepintojen mikro- tai makrotason karkeuden vaikutusta materiaalin jäykkyysmoduuliin ei ole tutkittu kovin laajasti /8/.

##### Rakeiden lujuus ja kiviaineksen kimmo-ominaisuudet

Karkearakeisten materiaalien rakeiden lujuus riippuu ensisijassa rakeiden kiviaineksen lujuudesta. Jääkauden aikana syntyneistä muodostumista peräisin olevat karkearakeiset materiaalit ovat luonnollisesta valikoitumisesta johtuen yleensä lujia ja hyvin kulutusta kestäviä. Kalliomurskepartikkelien lujuus sen sijaan riippuu kallion kivilajeista ja mahdollisesti tuotantotekniikasta /5/.

Mikäli raerunkoon kehittyvien palautuvien muodonmuutosten voidaan otaksua merkittävältä osin koostuvan rakeiden kontaktipintojen läheisyydessä tapahtuvista kiviaineksen kimmoisista muodonmuutoksista, riippuu myös raerungon makroskooppinen jäykkyys kiinteän kiviaineksen kimmo-ominaisuuksista. Tutkimuksia kiviainesmateriaalin kimmo-ominaisuuksien ja



näistä materiaaleista koostuvien todellisten partikkelisysteemien jäykkyys-  
sien välisistä todetuista riippuvuuksista ei kuitenkaan liene julkaistu /8/.

#### Mineraloginen koostumus

Kiviaineksen mineraloginen koostumus ja rakeiden rakenne sekä jakautu-  
ma vaikuttavat moninaisesti karkearakeisten materiaalien muodonmuutos-  
ominaisuuksiin. Käytännössä käyttäytymistä säätelee eri tekijöiden yhteis-  
vaikutus, joka riippuu sekä ympäristöolosuhteista että itse kiviaineksen omi-  
naisuuksista. Materiaalin sekä palautuvaan että palautumattomaan muo-  
donmuutokseen vaikuttava yksi tekijä on kiven mineraloginen koostumus ja  
rakenne /5/. Mineralogia vaikuttaa palautumattomaan muodonmuutuskäyt-  
täytymiseen jo kuivallakin materiaalilla rakeiden pintakitkan kautta. Kosteal-  
la materiaalilla kehittyvän näennäinen koheesio määräytyy raekokojakautu-  
man ohella ilmeisesti kiviaineksessa olevan hienoaineksen laadun mukaan,  
joka puolestaan riippuu suurelta osin kiven mineralogisesta koostumuk-  
sesta /5/.

Kiviaineksen mineralogisesta koostumuksesta ja kiven rakenteesta riippuvia  
ominaisuuksia ovat mm. pinnankarkeus, raemuoto ja kiviaineksen lujuus.  
Kiven koostumus ja rakenne määräävät myös pitkälti kiviaineksen kyvyn  
vastustaa kuormituksesta aiheutuvaa mekaanista hienonemista ja ympä-  
ristöolosuhteista aiheutuvaa kemiallista ja fysikaalista rapautumista. Kiven  
rakenteesta riippuu myös se, miten altista kiviaines on erityisesti kalliosta  
murskaamalla valmistetun materiaalin eri käsittelyvaiheissa tapahtuvalle  
sen moduuliinkin vaikuttavien ominaisuuksien heikkenemiselle /5/.

#### Fysikaalisten ominaisuuksien ja mineralogian huomiointi moduulin arvioin- timallissa

Kun karkearakeisen materiaalin jäykkyysmoduulin arviointiin käytetään jäl-  
jempänä esitettyä arviointimenettelyä (luku 3.4), jossa moduuli on esitetty  
huokoisuuden funktiona, tulee raemuodon vaikutus automaattisesti otettua  
huomioon materiaalille kokeellisesti määritettävän maksimihuokoisuusarvon  
avulla. Maksimihuokoisuutta suuremmissa tiiviyksissä moduulin kasvuno-  
peus oletetaan raemuodosta riippumattomaksi. Raemuodon huomioivissa  
arviointimenettelyn parametreissa  $a_1$  ja  $a_2$  erot luonnon kiviainesten ja kallio-  
murskeiden välillä ovat olleet hyvin pienet /8/.

Koska koetulosaineisto /8/ on sisältänyt vain suppeahkon määrän koostu-  
mukseltaan erilaisia kiviaineuksia, eikä niidenkään kimmo-ominaisuuksia ole  
tutkittu, ei kiviaineksen kimmo-ominaisuuksien nimenomaiselle huomioon-  
ottamiselle arviointimallissa ole ollut edellytyksiä. Sama koskee myös kivi-  
ainepartikkelien pintaominaisuuksia. Tämän johdosta erityisesti koostumuk-  
seltaan poikkeuksellisten kiviainesten jäykkyysmoduulit on syytä ainakin  
suuremmissa hankkeissa määrittää kokeellisesti ottopaikkakohtaisesti /8/.

Käytännössä tien kantavassa kerroksessa käytettävälle kiviainekselle ase-  
tetut laatuvaatimukset rajaavat jo suurimman osan heikkolaatuisimmasta  
kiviaineksesta pois kantavasta kerroksesta.

## 4.4 Muodonmuutosominaisuudet

### 4.4.1 Kiviainesten jäykkyysmoduuli

TPPT:ssä suoritettujen tutkimusten yhteydessä karkearakeisen kiviaineksen muodonmuutosominaisuuksiin merkittävimmin vaikuttavaksi tekijöiksi on todettu materiaalissa vaikuttava jännitystila sekä materiaalin tiiviys /8/, /9/.

Moduulin riippuvuutta jännitystilasta voidaan kuvata  $K$ - $\theta$  - kaavalla

$$M_r = K_1 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (3)$$

missä,

$M_r$  = jäykkyysmoduuli, kPa

$\theta$  = pääjännitysten summa, kPa ( $=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$ )

$\theta_0$  = vertailujännitys, 1 kPa

$K_1, K_2$  = materiaaliparametrit

TPPT:ssä suoritettujen kokeellisten tutkimusten tulosten jatkokäsittelyssä viitteissä /8/, /9/ esitetyt materiaaliparametrit ( $k_1, k_2$ ) on määritetty moduulin jännitystilariippuvuuden suhteen vertailujännitystilan osalta kaavasta (3) hieman eroavaan muotoon:

$$M_r = k_1 \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (4)$$

missä,

$\theta_0$  = vertailujännitys, 100 kPa

$k_1, k_2$  = materiaaliparametrit

Tätäkin mallia käytettäessä materiaalissa vaikuttava jännitystila tulee edelleen huomioon otetuksi pääjännitysten summan avulla. Muut materiaalin käyttäytymiseen vaikuttavat tekijät sisältyvät kertoimena olevaan vakiotermiin  $k_1$  ja jännitysepälineaarisuutta kuvaavaan eksponenttiin  $k_2$ .

Koetulosten jatkokäsittelyssä /8/, /9/ muodonmuutosominaisuuksien kuvaamiseen on kehitetty menettely, jossa jännitys- ja tiiviystilan vaikutukset huomioonottavalle arviointimallille on esitetty yleinen muoto

$$M_r = a_1 (n_0 - n) \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{b_1} \quad (5)$$

missä

$n$  = materiaalin huokoisuus

$a_1$  = materiaalin laadusta riippuva kerroin

$n_0$  = moduuliarvoa  $M_r=0$  vastaava teoreettinen huokoisuuden maksimiarvo

$b_1$  = eksponentti, jolle on esitetty vakioarvo 0.5

Kun edellä esitettyyn kaavaan on sijoitettu teoreettisen huokoisuuden tilalle kokeellisesti määritettävä maksimihuokoisuuden arvo  $n_{\max}$  ja eksponentille vakioarvo  $b_1=0.5$ , on saatu kaava muotoon:

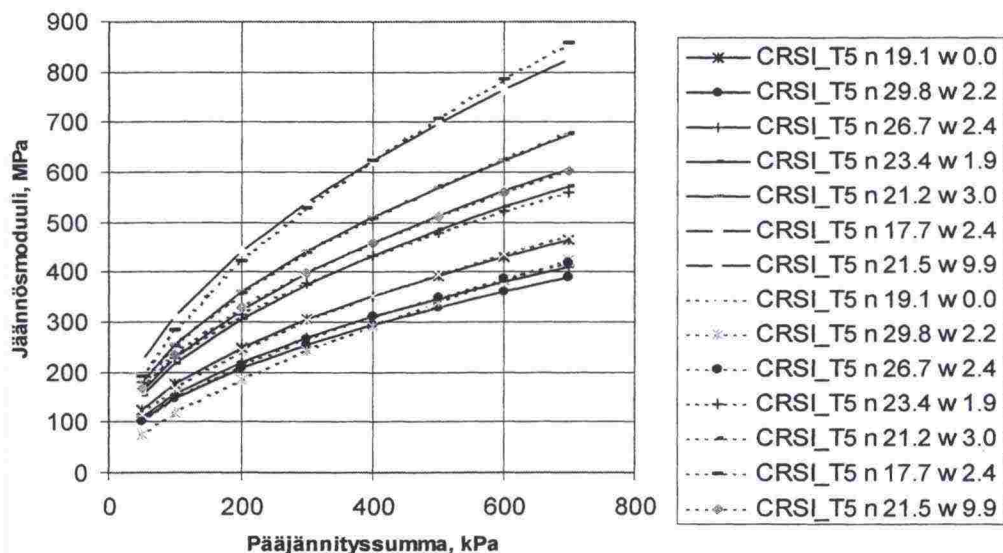
$$M_r = a_1 (n_{\max} - n) \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Tämän kaavan etuna on, että materiaalin jäykkyysmoduulin arviointiin riittää missä tahansa tiiviys- ja jännitystilassa yhden, riittävän laajan jännitysalueen kattavan kokeen suorittaminen. Tämän yhden kokeen tulosten perusteella ratkaistaan materiaalin rakeisuudesta, maksimiraekoosta, laadusta ja muista tekijöistä riippuva parametri  $a_1$ , jonka jälkeen jäykkyysmoduuli muissa jännitys- ja tiivistiloissa voidaan määrittää ko. materiaalille /9/. Itse kuormituskoe on suositeltu suoritettavaksi CEN-standardin kuormitusmenettelyyn perustuvana, koska SHPR-protokollan mukaisen kokeen kapeamasta deviatorisen jännityksen alueesta johtuen SHRP-kokeella saattavat moduulit saattavat jonkin verran yliarvioida todellista kuormitustilannetta /9/. Kaavassa (6) tarvittavan maksimihuokoisuuden arvon kokeellista määrittämistä on käsitelty viitteissä /8/ ja /9/.

Samalle koeaineistoille kaavoilla (4) ja (6) määritetyt moduulit eivät käytännössä esiintyvillä jännitysalueilla juurikaan poikkea toisistaan. Viitteessä /9/ esitettyjen parametrien mukaan kaavoilla (4) ja (6) lasketut riippuvuudet on esitetty kalliomurskeille kuvissa 11 ja 12 ja kuvassa 13 täydentävän tutkimuksen havaintotiemateriaaleille. Materiaalien rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 1.

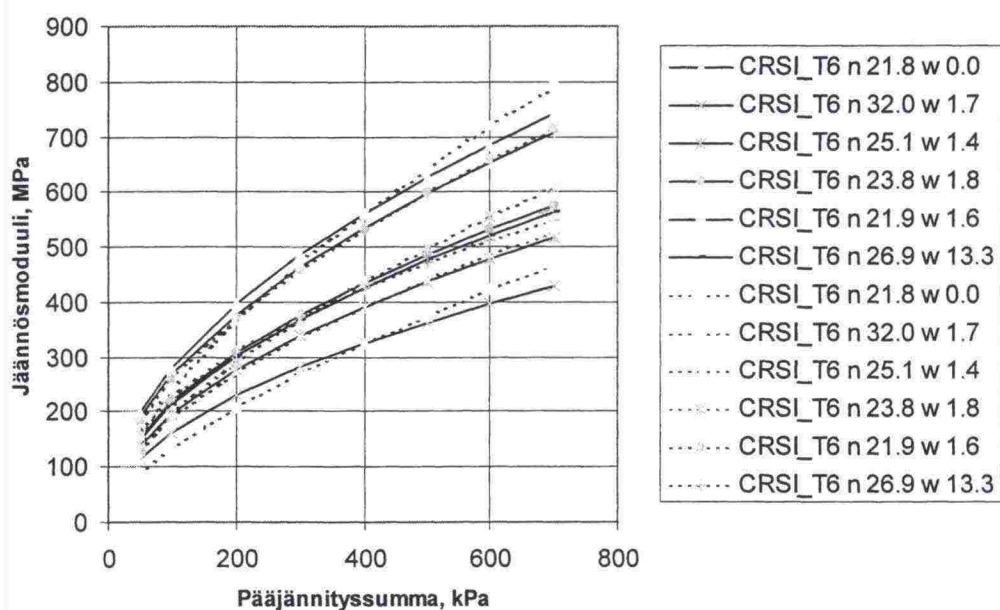


## Kalliomurske



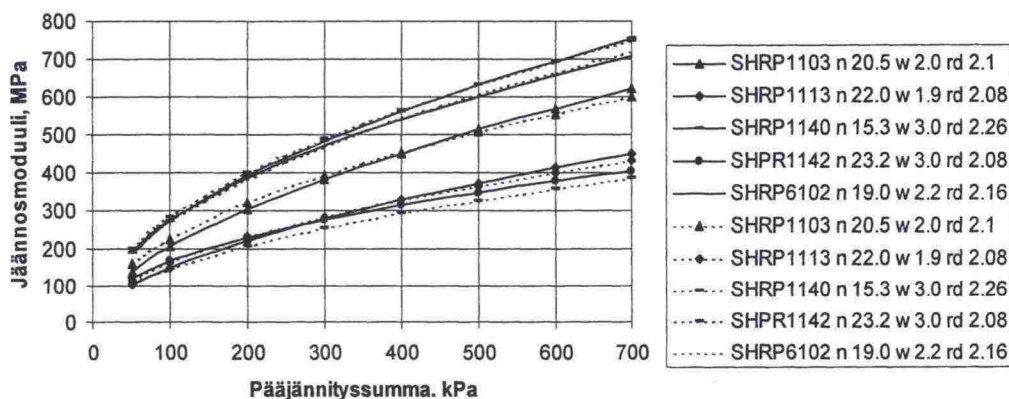
Kuva 11. Suhteistuneen kalliomurskeen (rakeisuus T5) jäykkyysmoduulit (kuvassa jännösmoduuli) pääjännityssumman funktiona ( $K-\theta$  mallin kaava 4 yhtenäinen viiva; tiivistilän huomioiva lineaarinen kaava 6 katkoviiva, näytteen nimen perässä huokoisuus n %:na ja vesipitoisuus w %:na, parametrit /9/).

## Kalliomurske



Kuva 12. Lajittuneen kalliomurskeen (rakeisuus T6) jäykkyysmoduulit (kuvassa jännösmoduuli) pääjännityssumman funktiona ( $K-\theta$  mallin kaava 1 yhtenäinen viiva; tiivistilän huomioiva lineaarinen kaava 4 katkoviiva, näytteen nimen perässä huokoisuus n %:na ja vesipitoisuus w %:na; parametrit /9/).

### Havaintoteiden materiaalit



Kuva 13. Havaintoteiden materiaalien jäykkyysmoduulit (kuvassa jäännösmoduuli) pääjännityssumman funktiona piirrettynä ( $K-\theta$  mallin kaava 2 yhtenäinen viiva; tiivistilan huomioiva lineaarinen kaava 4 katkoviiva, näytteen nimen perässä huokoisuus  $n$  %:na ja vesipitoisuus  $w$  %:na ja kuivatilavuuspaino  $rd$   $t/m^3$ ; parametrit  $/9/$  ja  $/8/$ ).

Moduuleille on määritetty myös vastaava (tiheyden suhteen) eksponenttimalli (7) sekä pääjännityksen summan ja deviatorisen jännityksen huomioivat lineaarimalli (8) ja eksponenttimalli (9)  $/8,9/$ .

$$M_r = a_2 (e^{2(n_{\max} - n)} - 1) \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$M_r = b_1 (n_{\max} - n) \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{0.7} \left( \frac{q}{\theta_0} \right)^{-0.2} \quad (8)$$

$$M_r = b_2 (e^{2(n_{\max} - n)} - 1) \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{0.7} \left( \frac{q}{\theta_0} \right)^{-0.2} \quad (9)$$

Näille malleille on esitetty sovituspärametrit ( $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ) viitteessä  $/9/$ . Ne on esitetty myös liitteessä 1.

Eksponenttimalli (9) huomioi jännitystilaa reuna-alueilla (pienillä tai suurilla pääjännityssumman arvoilla) hieman lineaarista mallia (8) paremmin, mutta käytännössä erot ovat melko pienet ja lineaarista mallia on suositeltu yksinkertaisuutensa takia  $/9/$ . Deviatorisen jännityksen huomioivia riippuvuuksia voidaan käyttää, mikäli koe on suoritettu riittävän laajalla deviatorisen jännityksen alueella.



Kaikkien edellä esitettyjen mallien parametrien numeroarvot luonnonsora-  
näytteiden, soramurskenäytteiden (osalla vain K- $\theta$  -mallin parametrit), kal-  
liomurskenäytteiden sekä havaintotiemateriaalien osalta on esitetty liittees-  
sä 1. Liitteessä 1 on esitetty K- $\theta$  -mallin parametreihin perustuen myös näi-  
den materiaalien jäykkyysmoduulien kuvaajat pääjännityksen funktiona.

#### 4.4.2 Poisson luku

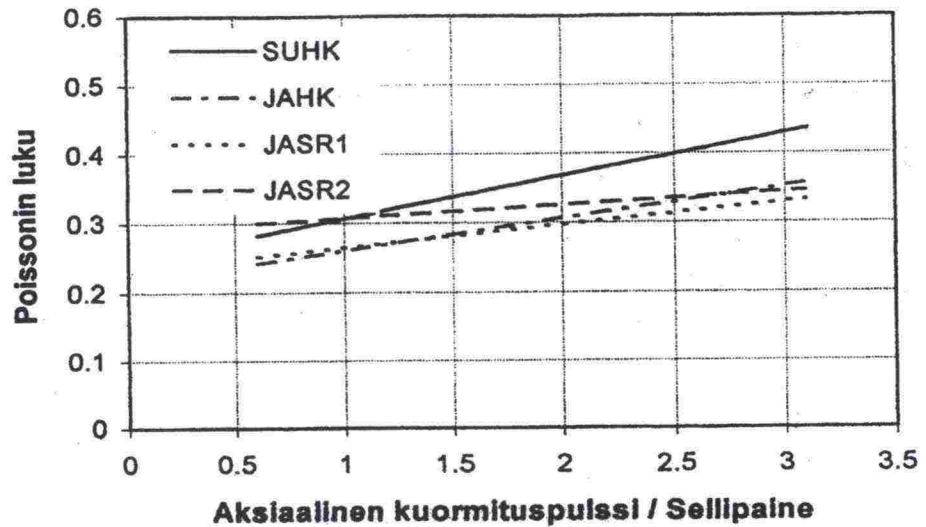
Toinen TPPT-suunnittelujärjestelmän kuormituskestävyysmitoitusmenette-  
lyssä tarvittava parametri on Poisson luku. Suunnittelujärjestelmässä tälle  
on esitetty käytettäväksi lähinnä taulukkoarvoja, vaikka periaatteessa suun-  
nittelujärjestelmässä pyritäänkin käyttämään materiaalikohtaisesti määritet-  
tyjä parametreja. Useimmiten Poisson luvun arvona käytetään karkearakei-  
silla materiaaleilla vakioarvoa  $\nu = 0.35$ . Vakioarvon käyttöä puoltaa useim-  
missa tapauksissa se, ettei Poisson luvun vaikutus mitoituksen kriittisimpiin  
jännityksiin ole käytännössä kovin suuri /9/.

Merkittävänä perusteluna taulukko- tai vakioarvojen käytölle on mm. se,  
ettei Poisson luvun määrittäminen karkearakeisille materiaaleille ole yksin-  
kertaista ja yksiselitteistä. Poisson luku kuvaa materiaalin palautuvien sä-  
teensuuntaisen ja aksiaalisten muodonmuutosten suhdetta. Kolmiakseliko-  
keissa hyvin karkearakeisilla materiaaleilla näytteessä tapahtuvat muodon-  
muutokset ovat kuitenkin hyvin pieniä. Tällöin näytteen pinnalta tapahtuva  
muodonmuutoksen mittaaminen on altis mittauspisteiden lähellä tapahtuville yk-  
sittäistenkin rakeiden siirtymille. Tämän johdosta tuloksiin syntyy hajontaa.

Sekä kirjallisuudessa esitettyjen tulosten että TPPT:ssä suoritettujen tutki-  
musten tulosten perusteella Poisson luvun on yleisesti todettu riippuvan  
materiaaliin kohdistuvasta jännitystilasta ja dynaamisesta kolmiakseliko-  
keesta erityisesti aksiaalisen kuormituspulssin ja sellipaineen suhteesta.  
Tämän suhteen kasvaessa Poisson luvun arvo kasvaa /8/.

Kuvassa 14 /8/ on esitetty TPPT:n materiaalitutkimusten yhteydessä tielai-  
toksen suunnitteluohjeen mukaisiin rakeisuusohjealueisiin sovitetuille näyte-  
materiaaleille yksittäisten mittaushavaintojen perusteella määritetyt Poisson  
luvun approksimaatiosuorat. Kokeet on suoritettu SHRP P46 protokollan  
mukaan. Tulosten mukaan Poisson luku kasvaa aksiaalisen kuormituspulssin  
ja sellipaineen kasvun myötä. Kasvu on sitä lievempää mitä karkeara-  
keisemmasta näytemateriaalista on kyse. Poisson luvun absoluuttiset arvot  
sen sijaan näyttäisivät olevan sitä suurempia mitä hienorakeisempaa mate-  
riaali on. Approksimaatiosuorien epäsäännöllisen käyttäytymisen on arveltu  
liittyvän säteittäisen muodonmuutoksen mittauksen epätarkkuuksiin, eivätkä  
havainnot näin ollen välttämättä kuvaa materiaalien välisiä todellisia käyt-  
täytymiseroja.

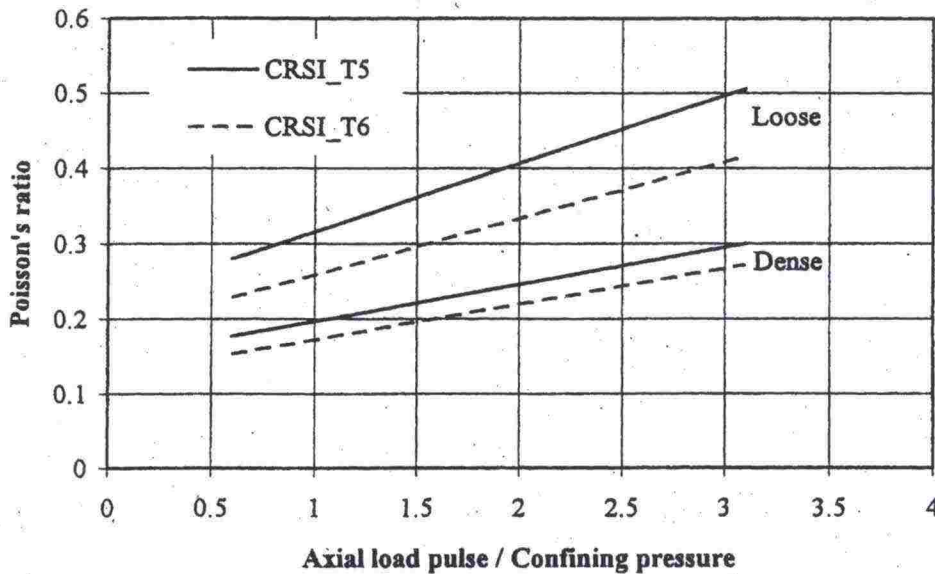




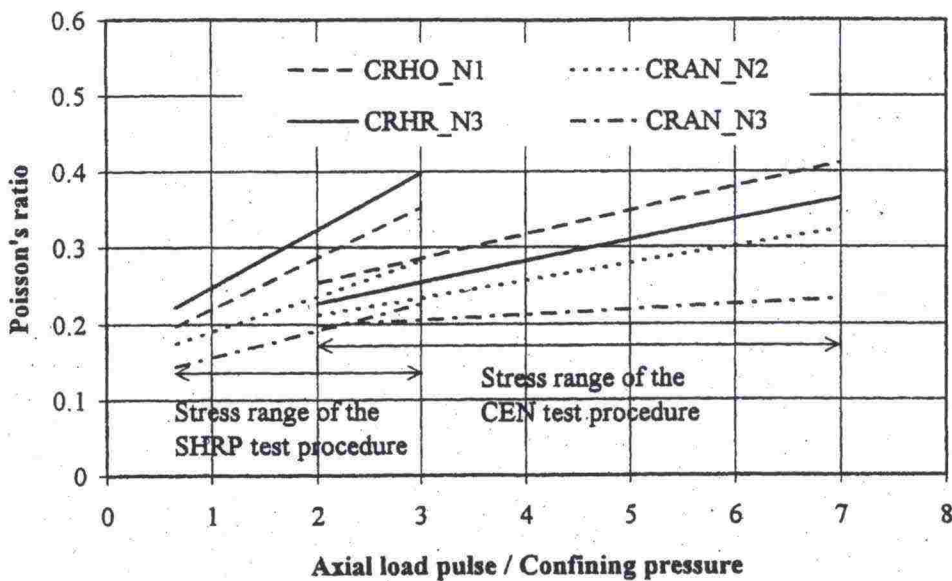
Kuva 14. Tielaitoksen suunnitteluohjeen mukaisiin ohjealueisiin sovitetuille näyttemateriaaleille määritetyt Poisson luvun arvot /8/.

Kuvassa 15 on esitetty Poisson lukujen vaihtelualue suhteistuneelle ja lajituneelle kalliomurskeelle, kun näytteet on kuormitettu löyhimmässä ja tiiveimmässä tilassa. Tiiviissä tilassa Poisson luvut ovat selvästi pienempiä kuin löyhässä tilassa. Lajittuneelle kalliomurskeelle määritetyt Poisson luvun arvot olivat absoluuttisilta arvoiltaan jonkin verran pienemmät kuin suhteistuneella kalliomurskeella ja tulosten vaihtelualueen koko oli myös jonkin verran pienempi. Tätä kuitenkin selittää ainakin osittain suhteistuneen materiaalin suurempi tiiviystilojen vaihtelualue /8/. Myös muilla tutkimuksissa käytetyillä materiaaleilla saadut tulokset ovat pääsääntöisesti noudattaneet edellä esitettyä käyttäytymistä /8/.

Edellä todettiin Poisson luvun arvon kasvavan jännityssuhteen kasvaessa. SHRP P46 -protokollan mukaisissa kuormituskokeissa kuormituspulssien ja sellipaineen suhde vaihtelee välillä 0.65...3.0. CEN:in testimenetelmän mukaisissa kokeissa suhteen vaihtelualue on puolestaan 2...7. Poisson luvun arvo näyttää kasvavan jännityssuhteen kasvaessa laajemmallaakin jännitysalueella, tosin hieman loivemmin kuin suppeammalla SHPR:n mukaisella jännitysalueella. Suuruusluokaltaan eri menetelmillä saadaan kuitenkin melko hyvin yhteensopivia arvoja. Kuvassa 16 /9/ on esitetty eräillä kalliomurskeilla eri menetelmillä määritetyt Poisson luvut. Suurimmat vaihtelut eri menetelmien välillä ovat rakeisuudeltaan karkealla sepelillä (CRHR\_N3). Selityksenä tämän materiaalin epä johdonmukaiselle käyttäytymiselle on esitetty aiemmin mainittuja mittausteknisiä ongelmia.



Kuva 15. Suhteistuneelle (CRSI\_T5) ja lajittuneelle (CRSI\_T6) kalliomurskema-  
terialeille löyhässä ja tiiviissä tilassa määritetyt Poisson luvun arvot /9/.



Kuva 16. Eräiden kalliomurskeiden Poisson luvut eri määritysmenetelmien mu-  
kaisilla jännitysalueilla /9/.

TPPT:n materiaalitutkimuksiin perustuen /9/ karkearakeisten materiaalien Poisson luvulle suositellaan käytettäväksi arvoa  $\nu = 0.30 \dots 0.35$  niissä ta-  
pauksissa, joissa vakioarvoa voidaan käyttää eli ainakin kaikkein tavan-  
omaisimmille rakenteille. Rakenteille, jotka eivät ole tavanomaisia, esitettyjä  
Poisson luvun arvoja voidaan korjata ottamalla huomioon kulloisessakin  
tilanteessa vallitseva pysty- ja vaakajännitysten suhde /9/.

#### 4.5 Kirjallisuusviitteet lukuun 4

- /1/ Belt, J., Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformatuminen. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 15/1997. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki 1997. TIEL 4000173. 55 s. + liitt. 11 s.
- /2/ Cost 337 draft report, 2000. Cost 337 "Unbound Granular Materials for Road Pavements", EU Transport Research.
- /3/ Courage draft report, 2000. Courage "Construction with Unbound Road Aggregates in Europe". EU projekti.
- /4/ I. Hoff, R.S. Nordal, 2000. Permanente deformasjoner I granulaere lag I dekkkonstruksjoner. Sintef Bygg og miljøteknikk. Rapport nr. STF22 A00451.
- /5/ Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993, TIEL 3200163. Helsinki, 1993. 147 s.
- /6/ Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Esiselvityksen laboratoriokokeet. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993, TIEL 3200164. Helsinki, 1993. 71 s.
- /7/ Kolisoja, P., TPPT-projekti M12; Loppuraportti: Sitomattomien materiaalien moduulit - Vuoden 1995 kokeet. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996, TIEL 3200402. Helsinki, 1996. 49 s. + 19 liit.
- /8/ Kolisoja, P., TPPT-projekti M12; Loppuraportti: Sitomattomien materiaalien moduulit - Muodonmuutosmoduulin arviointimenettely. Tielaitoksen selvityksiä 44/1996, TIEL 3200412. Helsinki, 1996. 79 s.
- /9/ Kolisoja, P. Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publications 223. Tampere 1997. 188 p. + 13 app.
- /10/ Odermatt, N., Permanent deformation in fine-grained subgrade materials. Triaxial and accelerated pavement tests. Licentiate thesis. KTH, Stockholm 2000.
- /11/ Saarenketo, T. et al. 2001. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. Helsinki 2001.
- /12/ Juvankoski, M. ja Laaksonen, R. Sitomattomat tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalien käyttäytymisestä. TPPT Työraportti (luonnos 10.8.2001).



## **4.6 LIITTEET lukuun 4**

**LIITE 1 Sitomattomien materiaalien moduulit**

**LIITE 2 Esimerkki sitomattomien materiaalien jännitystilasta riippuvien moduulien käytöstä**

LIITE 1.1(17)

**SITOMATTOMIEN MATERIAALIEN MODUULIT**

Kuvien ja taulukoiden materiaalien nimeämisessä on noudatettu viitteen /9/ merkintöjä, jotka koostuvat

- materiaalityypin englanninkielisen nimen alkukirjaimista,
- materiaalin ottopaikan nimen (alku)kirjaimista ja
- materiaalin rakeisuutta vastaavasta tunnuksesta.

Materiaalien rakeisuudet on jäljempänä esitetty rakeisuuspohjilla. Materiaalien rakeisuudet on merkitty tunnuksin T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8 tai OR, jolla tarkoitetaan alkuperäistä rakeisuutta. Materiaalityyppien ja ottopaikkojen lyhenteet ovat:

Materiaalityyppi		Ottopaikka
Luonnon sora	Natural gravel / <b>NA</b>	Halila / <b>HA</b>
Soramurske	Crushed gravel / <b>CG</b>	Maksamaa / <b>MA</b>
Kalliomurske	Crushed rock / <b>CR</b>	Nurmo / <b>NU</b>
		Pälkäne / <b>PA</b>
		Sievi / <b>SI</b>
		Ylöjärvi / <b>YL</b>
		Hedrum / <b>HE</b>
		Hordaland / <b>HR</b>
		Hovimoen / <b>HO</b>
		Steinskogen / <b>ST</b>
		Visnes / <b>VI</b>
		Åndalen / <b>AN</b>

Materiaalin tunnus on siten esimerkiksi NAPA\_T1, mikä tarkoittaa Pälkäneen luonnonsoraa, jonka rakeisuus on T1. Havaintoteiden materiaalit on nimetty erillisin tunnuksin, esim. SHRP1103\_OR, joiden liittyvät tieosat on esitetty viitteessä /8/.

Kuviin on piirretty K- $\theta$  - mallin mukaiset moduulit pääjännityssumman funktiona. Materiaalin tunnuksen ohella kuviin on merkitty materiaalin huokoisuus, vesipitoisuus sekä tiheys laboratoriokokeessa. Kuvat on ryhmitelty materiaaleittain ja rakeisuuksittain. Kalliomurskeilla lajittelu on suoritettu myös vesipitoisuuden ja huokoisuuden perusteella. Lopussa on esitetty myös ennen TPPT:tä alustavissa kokeissa tielaitoksen ohjeiden rakeisuusalueiden mukaisilla materiaaleilla suoritettujen laboratoriokokeiden tulokset erikseen ryhmitettyinä. Näissä käytetyt merkinnät poikkeavat edellä esitetystä, mutta merkinnät selviävät ao. kohdasta.

## LIITE 1.2(17)

Materiaalit on käsitelty järjestyksessä

- luonnon sora
- soramurske
- kalliomurske
- havaintoteiden materiaalit
- tielaitoksen ohjeiden rakeisuusalueiden mukaiset materiaalit.

## Eräitä testimateriaalien ominaisuuksia /9/

Otopaikka	Kivilaji	Kiintotiheys t/m <sup>3</sup>	Los Angeles -luku
Halila / HA	gneissi	2.72	27.1
Maksamaa / MA	granodioriitti	2.68	23.3
Nurmo / NU	grauvakka	2.70	76.1
Pälkäne / PA	sora	2.67	-
Sievi / SI	vulkaniitti	2.77	15.6
Hedrum / HE	syeniitti	2.72	32.9
Hordaland / HR	gneissi	2.66	16.2
Hovimoen / HO	sora	2.66	23.0
Steinskogen / ST	basaltti	2.91	10.2
Visnes / VI	kalkkikivi	2.70	39.5
Åndalen / AN	gneissi	2.92	18.4

## Sievin kalliomurskeen ominaisuudet /6/.

Los Angeles -luku	15.6
parannettu haurausarvo	12.5
hioutuvuusluku	1.57
muotoarvo 8-12 mm	2.545 / 1.623
muotoarvo 12-16 mm	2.514 / 1.643
hehikutushäviö, %	1.51
pistekuormitusindeksi	16.92 (8.1-22.4)

Päämineraalit	%
plagioklaasi	40
kvartsi	25
amfiboli	18
epidootti	11



LIITE 1.3(17)

TESTIMATERIAALIEN PALAUTUVAN MUODONMUUTOKSEN PARAMETRIT /9, 7/

Luonnonsoranäytteet												
	Testi- tyyppi	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	k1 kaava 4	k2 kaava 4	a1 kaava 6	a2 kaava 7	b1 kaava 8	b2 kaava 9
NGPA_T1	S	1.99	2.66	25.4	5.3	41	1530	0.516	5750	2162	4527	1702
NGPA_T2	S	2.05	2.67	23.2	4.1	36	1794	0.547	6386	2331	5039	1838
NGPA_T3	S	2.15	2.67	19.4	3.8	43	2348	0.512	9286	3552	7325	2801
NGPA_T4	S	2.08	2.67	22.0	1.7	16	2120	0.526	11273	4605	8881	3631
NGPA_T5	S	2.18	2.67	18.4	3.0	36	2161	0.522	10614	4271	8292	3338
NGPA_T6	S	2.16	2.67	19.0	1.9	21	2318	0.508	12706	5247	9973	4119
NGHO_OR	S	2.11	2.67	20.6	5.0	51	1721	0.500	8183	3291	6438	2590
Soramurskenäytteet												
	Testi- tyyppi	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	k1 kaava 4	k2 kaava 4	a1 kaava 6	a2 kaava 7	b1 kaava 8	b2 kaava 9
CGYL_T5	S	2.16	2.68	19.7	0	0	2070	0.461				
		2.04	2.69	24.3	2.7	23	2120	0.447	ei nmax arvoa			
		2.08	2.69	22.8	11.0*	100*	1990	0.484				
CGTL_T6	S	2.04	2.69	24.3	0	0	2810	0.476				
		1.95	2.69	27.4	1.8	13	2420	0.411	ei nmax arvoa			
		1.99	2.69	25.9	13.0*	100*	1660	0.517				
CGHO_OR	S	2.06	2.66	22.4	5.5	50	1439	0.565	7683	3100	6058	2444
CGNO_N1	S	2.16	2.66	18.8	4.1	48	1798	0.544	7875	3057	6195	2405
	C	2.16	2.66	19.0	3.8	43	1415	0.609	6467	2513	5679	2206
	N	2.17	2.66	18.4	-	-	1312	0.653	6891	2663	5971	2310
	S,C	2.16	2.66	18.9	4.0	46	1552	0.620	7432	2886	6061	2351
	S,C,N	2.16	2.66	18.7	-	-	1590	0.584	7301	2835	6040	2343
Kalliomurskenäytteet												
	Testi- tyyppi	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	k1 kaava 4	k2 kaava 4	a1 kaava 6	a2 kaava 7	b1 kaava 8	b2 kaava 9
CRSI_T3	S	2.22	2.77	19.9	3.2	36	2105	0.568	8381	3137	6609	2474
CRSI_T4	S	2.08	2.77	24.9	1.8	15	2145	0.535	11137	4522	8575	3480
		2.08	2.77	25.1	1.9	15	1804	0.577	10059	4087	7902	3214
		2.06	2.77	25.6	-	-	2090	0.511	10895	4451	8551	3496
CRSI_T5	S	2.24	2.77	19.1	0.0	0	1682	0.532	7475	2927	5786	2263
		1.95	2.77	29.8	2.2	14	1169	0.662	11469	5035	9009	3954
		2.03	2.77	26.7	2.4	18	1476	0.536	9750	4138	7658	3250
		2.12	2.77	23.4	1.9	17	2290	0.459	11243	4605	8569	3507
		2.18	2.77	21.2	3.0	31	2508	0.510	11881	4754	9222	3696
		2.28	2.77	17.7	2.4	30	2832	0.569	12523	4824	9844	3796
		2.17	2.77	21.5	9.9*	100*	2340	0.486	10852	4359	8305	3335
CRSI_T6	S	2.17	2.77	21.8	0.0	0	2373	0.619	13189	5294	10192	4091
		1.88	2.77	32.0	1.7	10	1336	0.641	14724	6582	11581	5173
		2.08	2.77	25.1	1.4	12	1877	0.531	10902	4528	8357	3473
		2.11	2.77	23.8	1.8	16	1931	0.588	11319	4636	8896	3643
		2.16	2.77	21.9	1.6	16	2588	0.520	12639	5081	9913	3982
		2.02	2.77	26.9	13.3*	100*	2257	0.456	13208	5597	10123	4290
CRSI_T7	S	2.21	2.77	20.3	0.0	0	1359	0.545	5789	2229	4544	1750
		2.19	2.77	20.9	2.4	26	2185	0.511	9105	3526	7144	2768
		2.21	2.77	20.2	3.1	34	2260	0.600	10381	3997	8174	3146
		2.21	2.77	20.4	7.2	88	2405	0.497	9618	3711	7526	2902
		2.22	2.77	19.9	6.9	87	2206	0.554	9372	3593	7369	2826
		2.20	2.77	20.5	7.1	86	1906	0.515	7850	3032	6169	2383
		2.19	2.77	21.1	-	-	1878	0.563	8475	3294	6674	2594

## LIITE 1.4(17)

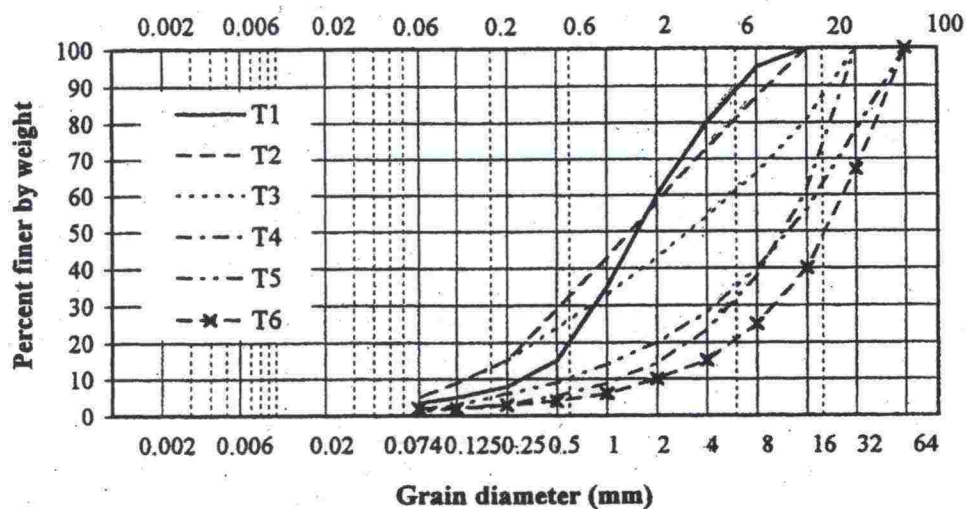
Kalliomurskenäytteet												
	Testi- tyyppi	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	k1 kaava 4	k2 kaava 4	a1 kaava 6	a2 kaava 7	b1 kaava 8	b2 kaava 9
CRSI_T8	S	1.71	2.77	38.4	0.0	0	1529	0.556	14073	6242	11063	4901
		1.76	2.77	36.6	0.0	0	1656	0.509	12466	5431	9817	4277
		1.69	2.77	38.8	0.0	0	1747	0.436	14157	5300	11136	4955
		1.75	2.77	37.0	0.5	2	2759	0.477	20352	8900	16008	6998
CRHA_T5	S	2.17	2.77	21.7	2.6	26	2501	0.500	11204	4433	8828	3491
		2.17	2.77	21.6	6.5	75	1884	0.551	9008	3561	7073	2794
CRHA_T6	S						1962	0.524	11123	4607	8750	3624
	C	2.07	2.77	23.5	1.8	15	1562	0.604	9448	3914	8296	3436
	S,C						1660	0.611	10441	4323	8592	3557
CRNU_T5	S	2.17	2.77	21.5	2.5	25	1815	0.502	7677	2998	6040	2358
CRNU_T6	S	2.17	2.77	23.8	1.8	16	1579	0.533	8930	3689	7026	2092
CRHE_N2	S	2.21	2.72	18.9	2.6	30	2288	0.564	9981	3841	7877	3031
CRST_N2	S	2.29	2.91	21.3	4.6	49	2300	0.514	8594	3226	6780	2546
CRVI_N2	S	2.30	2.70	14.9	3.4	52	2998	0.640	12916	4791	10197	3785
CRAN_N2	S	2.34	2.92	19.9	3.8	45	2615	0.581	11563	4439	9119	3500
	C	2.32	2.92	20.7	3.4	38	2106	0.608	9551	3699	8393	3251
	N	2.33	2.92	20.2			2499	0.513	10219	3934	9296	3577
	S,C	2.33	2.92	20.3	3.6	42	2278	0.646	10957	4214	8933	3439
	S,C,N	2.33	2.92	20.3			2548	0.530	10661	4104	9057	3485
CRHE_N3	S	1.80	2.72	33.8	0.5	2	2296	0.527	15291	6513	12042	5130
CRHR_N3	S	1.73	2.66	34.8			1807	0.531	12297	5246	9648	4118
	C	1.73	2.66	34.8	0.5	2	1731	0.481	11135	4756	9799	4185
	S,C	1.73	2.66	34.8			1673	0.564	11813	5041	9704	4142
CRST_N3	S	1.78	2.91	38.7	0.7	3	2387	0.430	16168	7056	12723	5544
CRAN_N3	S	1.81	2.92	38.1	0.5	2	2509	0.530	22750	10117	17920	7970
	C	1.82	2.92	37.8	0.5	2	2575	0.504	22188	9856	19558	8681
	N	1.78	2.92	39.0			734	0.513	20196	9073	16241	7298
	S,C	1.81	2.92	38.0	0.5	2	2569	0.511	22569	10031	18372	8169
	S,C,N	1.81	2.92	38.0			2620	0.499	22863	10174	18651	8302
Havaintoteiden näyttemateriaalit												
	Testi- tyyppi	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	k1 kaava 4	k2 kaava 4	a1 kaava 6	a2 kaava 7	b1 kaava 8	b2 kaava 9
CRMA_OR	S	2.20	2.77	20.5	2.7	29	2617	0.504	10087	3840	7937	3023
CRMA_OR	S	2.21	2.77	20.1	5.8	84	2107	0.457	7484	2837	5890	2234
SHRP1103	S	2.10	2.66	20.9	2.0	20	2055	0.568	9180	3549	7217	2792
SHRP1113	S	2.08	2.67	22.0	1.9	18	1509	0.562	8156	3312	6406	2601
SHRP1140	S	2.26	2.67	15.3	3.0	44	2724	0.522	10573	4007	8321	3153
SHRP1142	S	2.08	2.71	23.2	3.0	27	1669	0.456	6924	2736	5448	2153
SHRP6102	S	2.16	2.67	19.0	2.2	25	2763	0.483	11143	4329	8760	3403
* arvo ei ole luotettava Kuormitusmenettely S=SHRP, C=CEN, N=NGI												
Tielaitoksen ohjealueiden mukaiset materiaalit												
		$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s$ t/m <sup>3</sup>	n %	w %	Sr %	K1	K2				
SUHK		1.99		25.4	5.3	41	1577	0.484				
JAHK		2.05		23.2	4.1	37	1888	0.498				
JASR1		2.15		19.5	3.8	43	2422	0.480				
JASR2		2.08		22.0	1.7	16	2198	0.488				
JASR3		2.18		18.4	3.0	36	2244	0.485				
JASR4		2.16		19.0	1.9	22	2387	0.480				
KAMU1		2.22		19.9	3.2	36	2057	0.577				
KAMU2		2.08		24.9	1.8	15	2233	0.496				



LIITE 1.5(17)

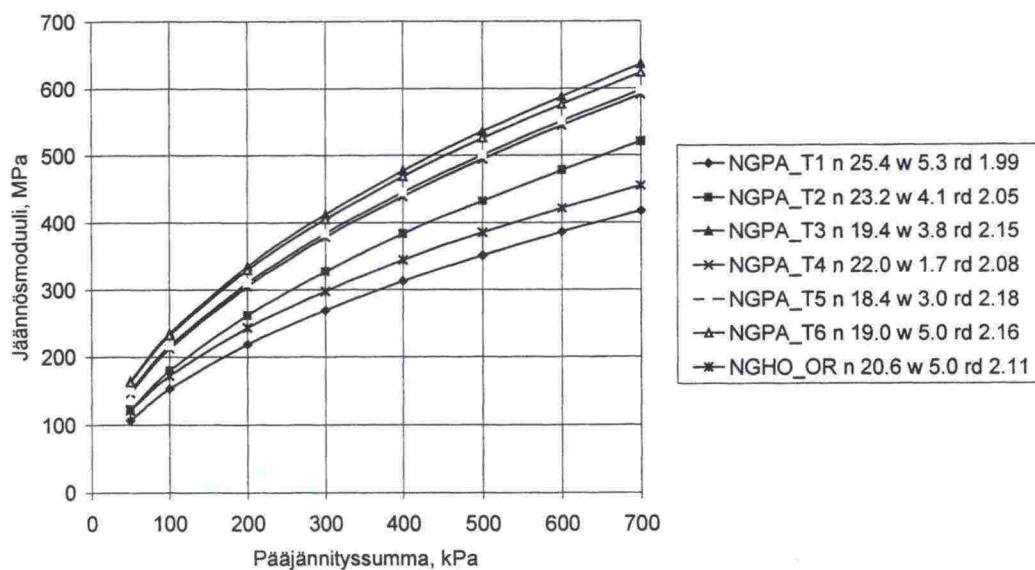
TESTIMATERIAALIEN RAKEISUUDET JA MODUULIT

Luonnon sora



Luonnon soran näytteiden tavoiterakeisuudet /9/.

Luonnon sora

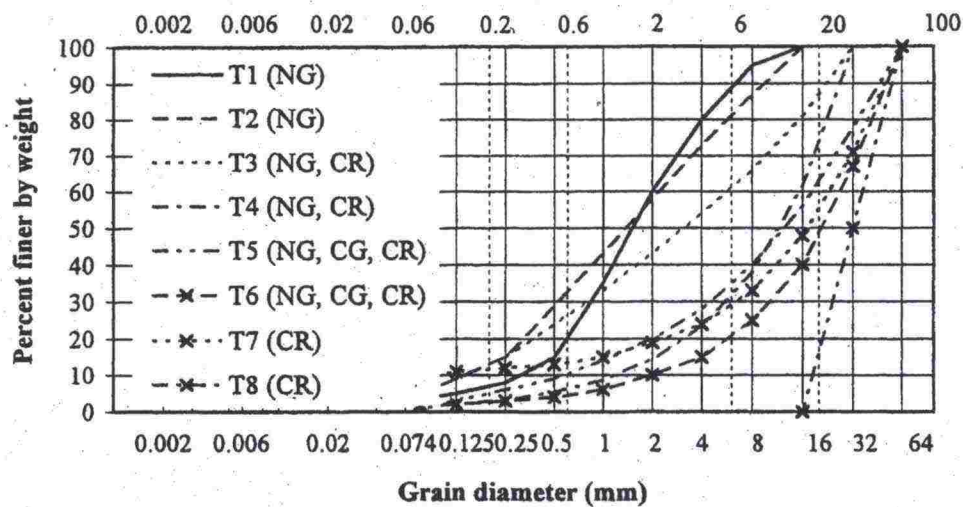


Luonnon soran näytteiden jäykkysmoduulit.

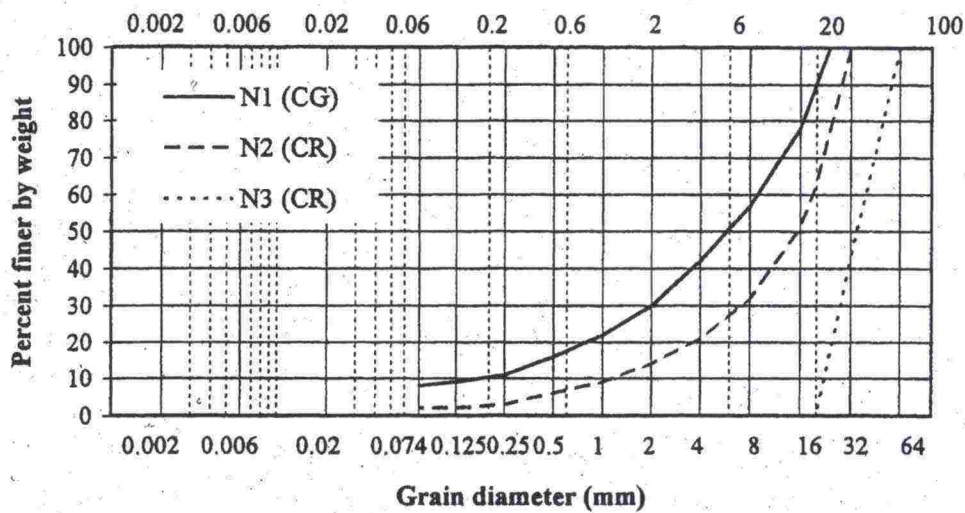


## LIITE 1.6(17)

## Soramurske



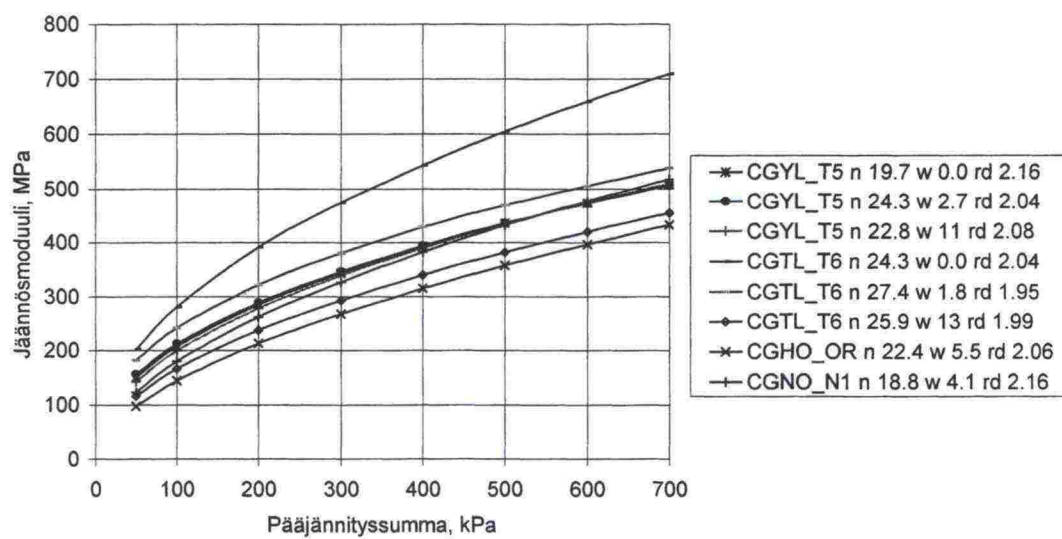
Suomalaisten sora- ja kalliomurskeiden näytteiden tavoiterakeisuudet  
/9/.



Soramurskeen N1 näytteen tavoiterakeisuus (norjalainen materiaali)  
/9/.

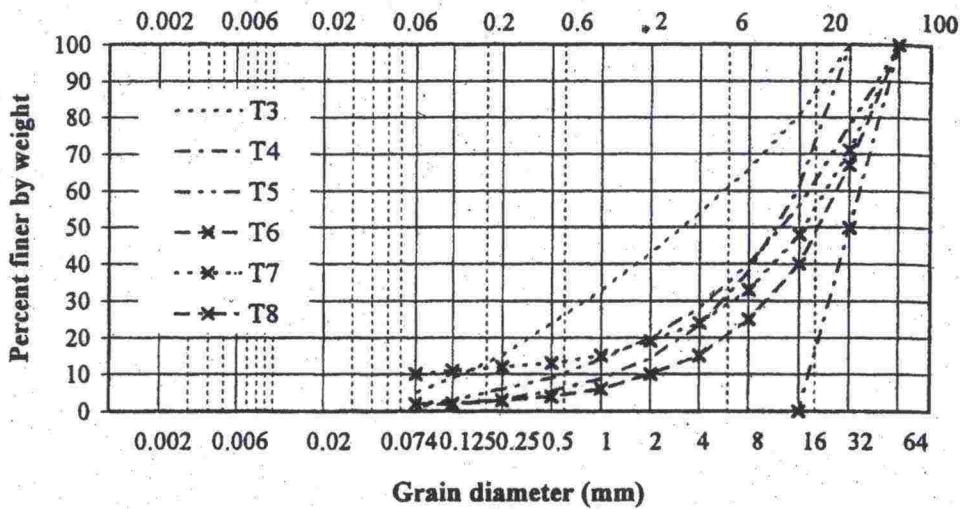
LIITE 1.7(17)

Soramurske

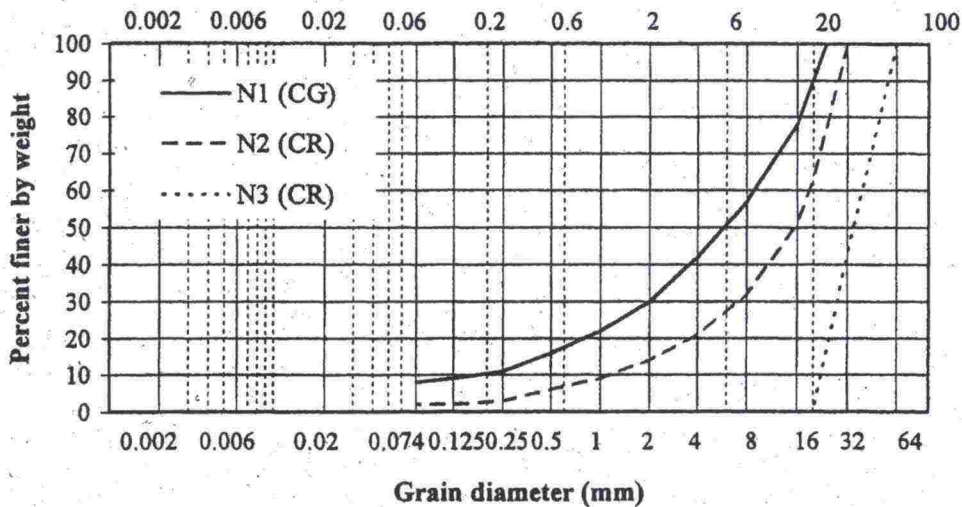


## LIITE 1.8(17)

## Kalliomurske



Kalliomurskeiden näytteiden tavoiterakeisuudet (suomalaiset materiaalit) /9/.

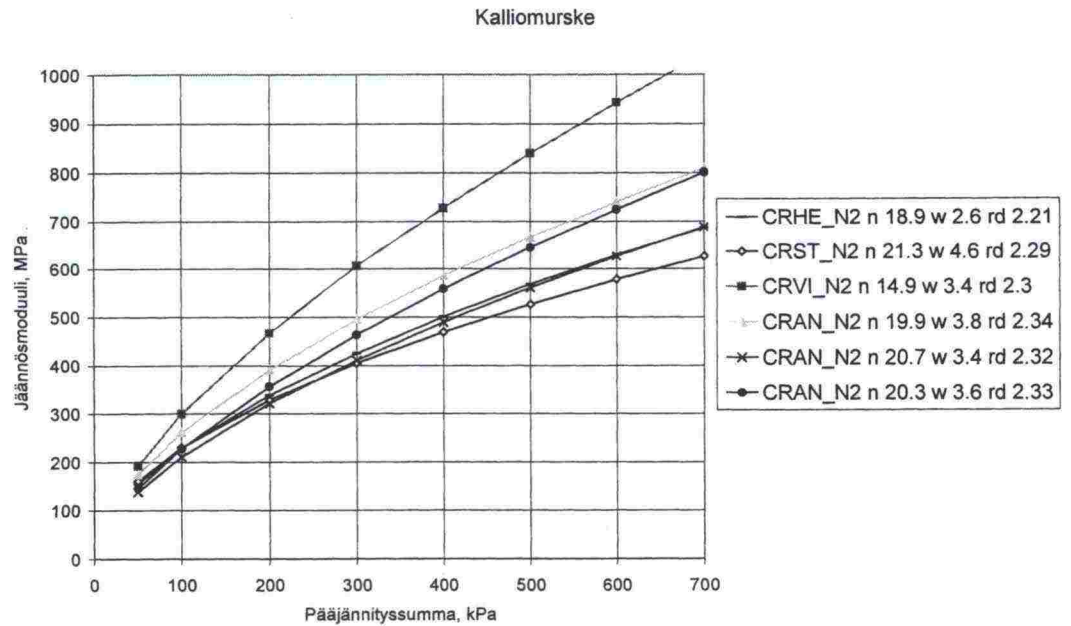


Kalliomurskeiden N2 ja N3 näytteiden tavoiterakeisuudet (norjalaiset materiaalit) /9/.

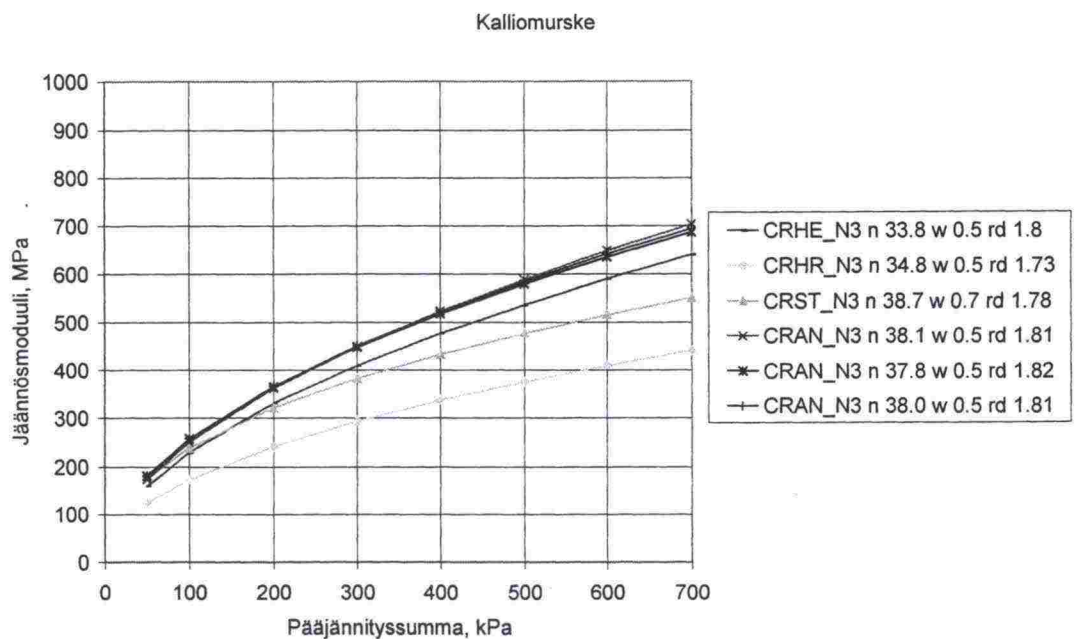


LIITE 1.9(17)

Kalliomurskeiden moduulit rakeisuuksien mukaan lajiteltuna.

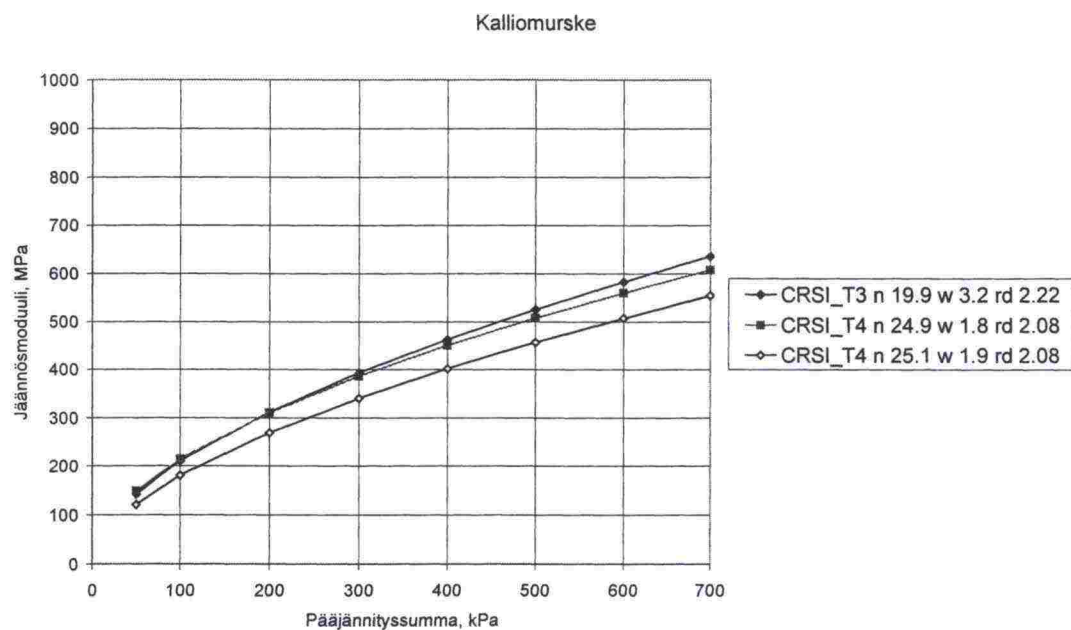


Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus N2.

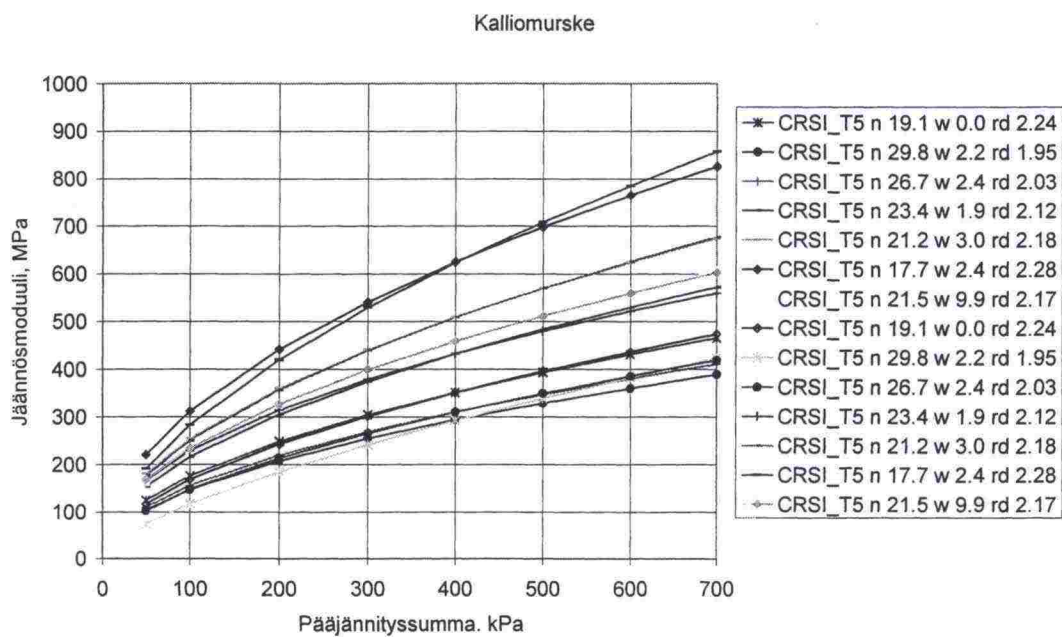


Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus N3.

## LIITE 1.10(17)

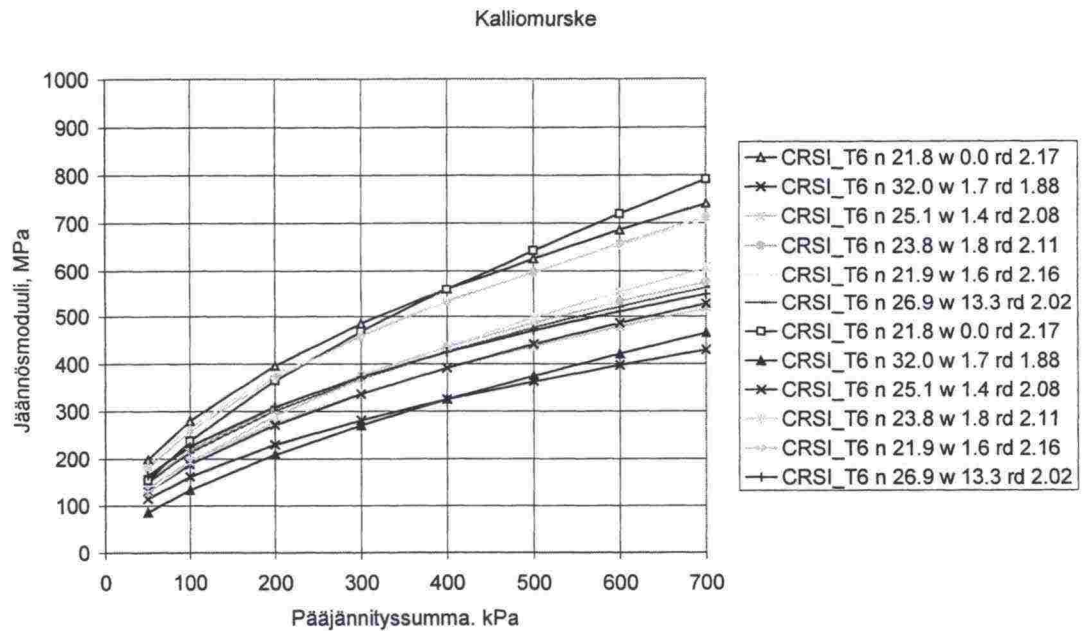


Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuudet T3 ja T4.

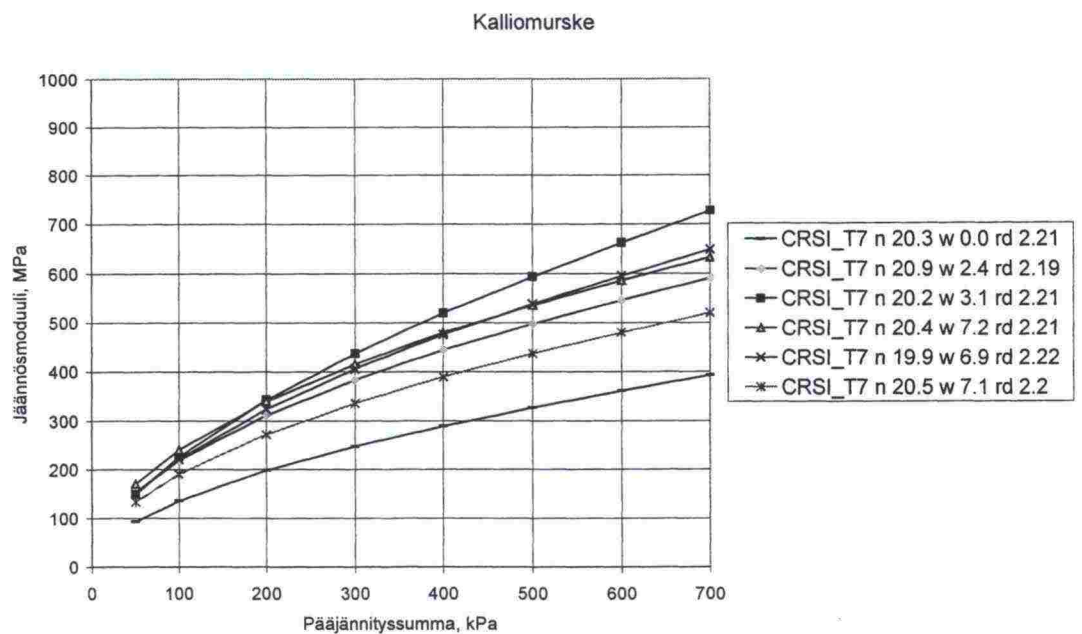


Kalliomurskenäytteiden näytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus T5.

LIITE 1.11(17)



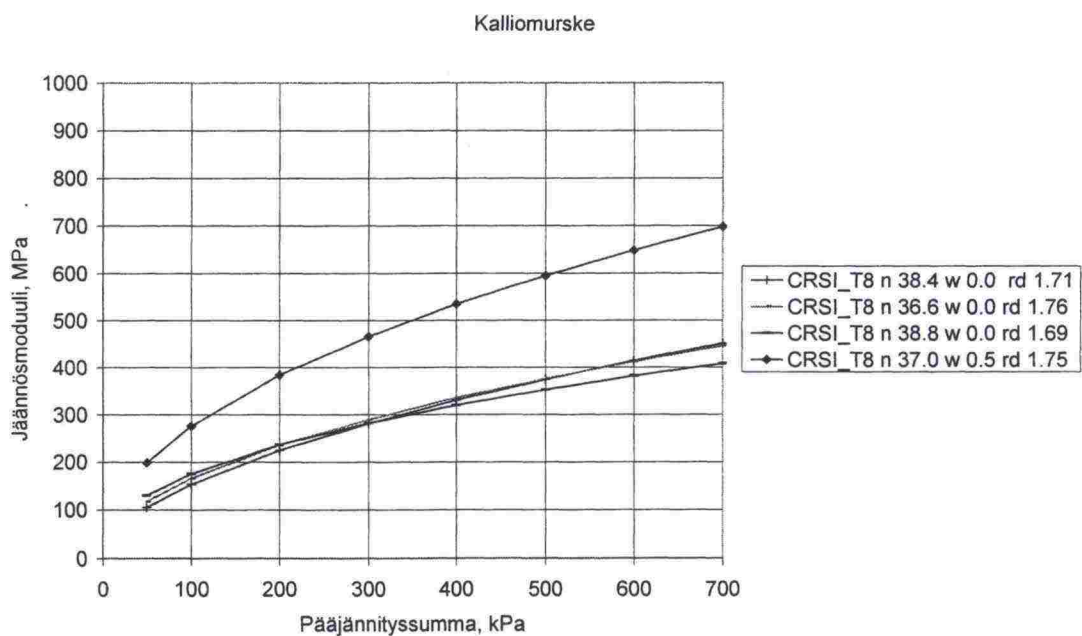
Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus T6.



Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus T7.



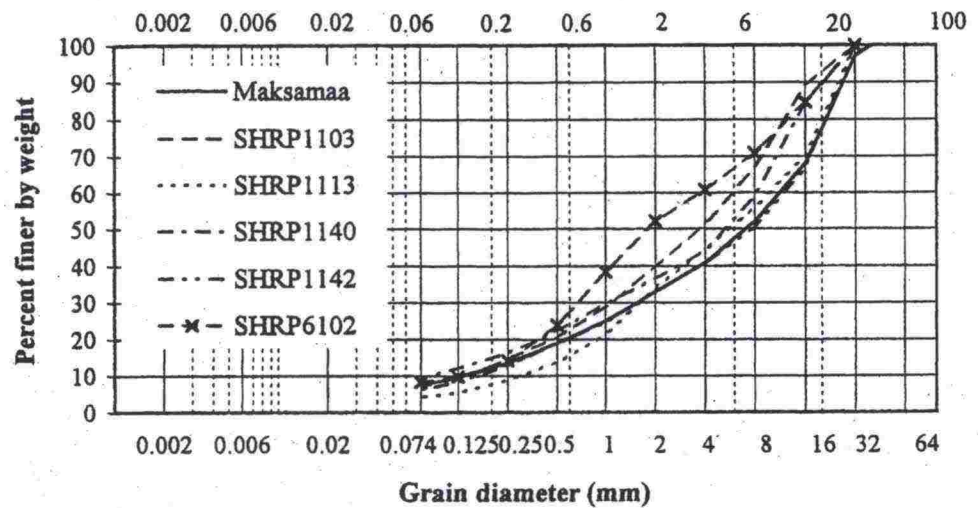
## LIITE 1.12(17)



Kalliomurskenäytteiden jäykkyysmoduulit. Rakeisuus T8.

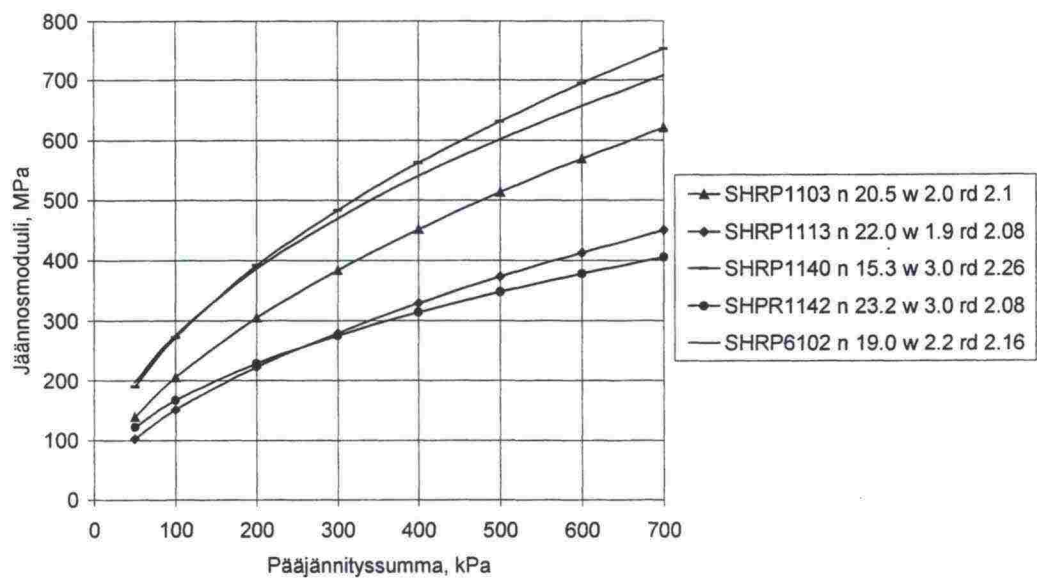
LIITE 1.13(17)

SHRP-havaintoteiden materiaalit



Havaintoteistä kaivettujen murskeiden näytteiden rakeisuuskäyrät /9/.

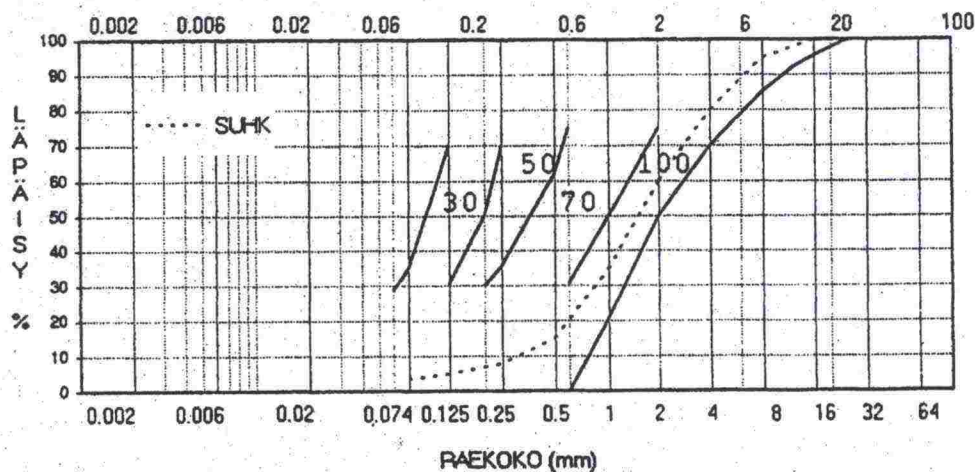
Havaintoteiden materiaalit



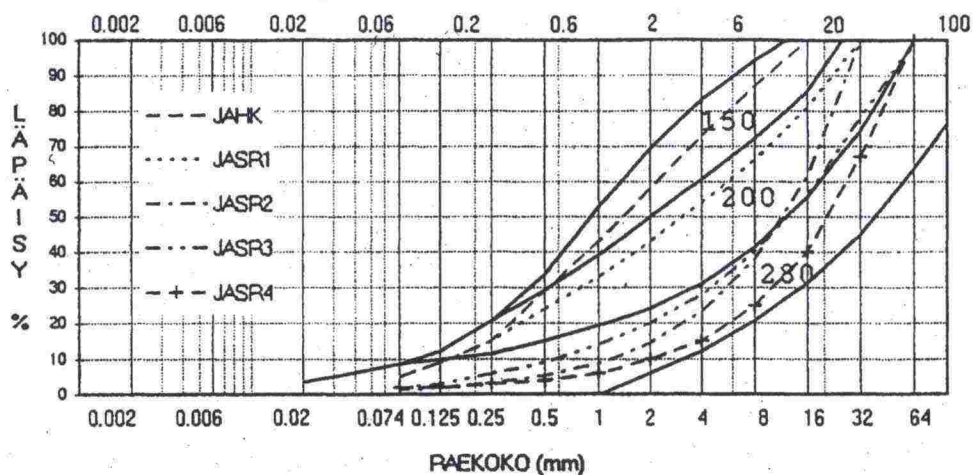
Havaintoteistä kaivettujen näytteiden jäykkyysmoduulit.

## LIITE 1.14(17)

## Tielaitoksen rakeisuusalueiden mukaiset materiaalit



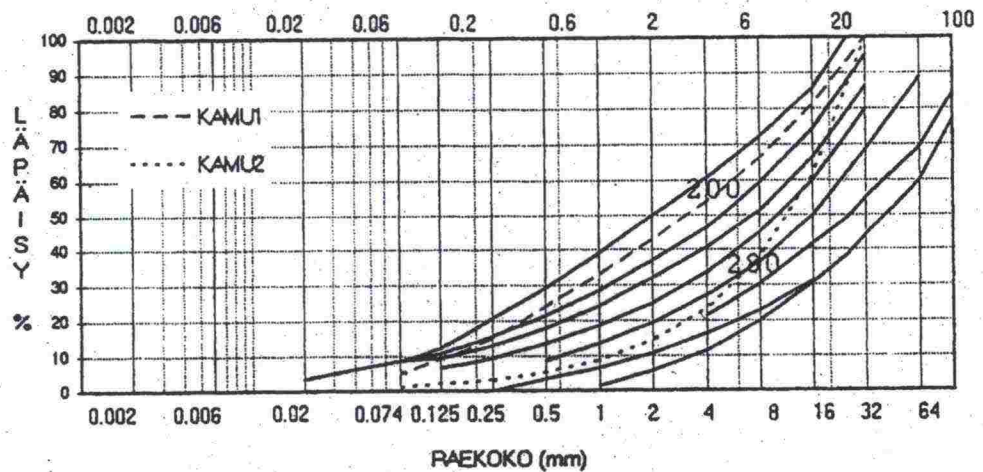
Suodatinkerroksen materiaalin ohjealue ja sille sovitettu näytemateriaalin rakeisuuskäyrä /7/.



Jakavan kerroksen kiviainesten ohjealue ja sille sovitettujen näytemateriaalien rakeisuuskäyrät /7/.

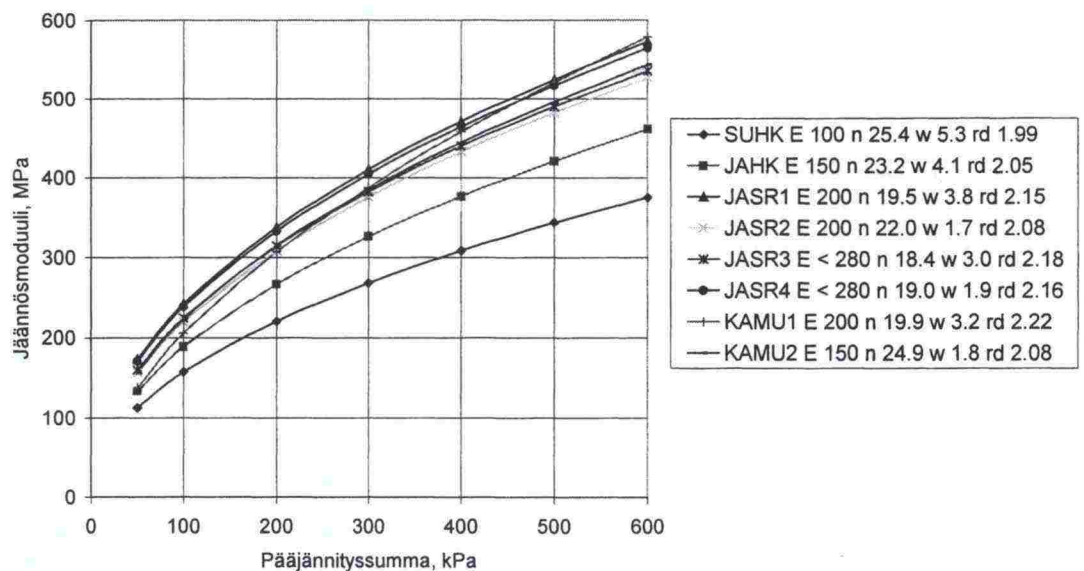


LIITE 1.15(17)



Kantavan kerroksen kiviainesten ohjealue ja sille sovitetut näytemateriaalien rakeisuuskäyrät /7/.

Tielaitoksen ohjealueiden mukaiset materiaalit



Tielaitoksen rakeisuusohjealueiden mukaisten materiaalien jäykkyysmoduulit.

## LIITE 1.16(17)

**LABORATORIOKOKKEET**

Laboratoriokokeiden esittely on jaettu rae- ja materiaaliominaisuuksien määrittämenetelmiin.

**Luokittelukokeet / Indeksikokeet**

- Kiertotiivistinlaite (ICT -laite), käyttö materiaalien luokittelussa tiivistyvyyden ja pysyvien muodonmuutosten kannalta
- Kolmiakselikoe -laite, käyttö materiaalien luokittelussa sekä palautuvien ja pysyvien muodonmuutosten määrittämisessä,
- Tierakenteen tutkimuslaite (TKT -laite), käyttö pysyvien muodonmuutosten määrittämisessä, materiaalien luokittelussa, mitoitusmenetelmien tarkistamisessa

**Mitoitusjäykkyyden määrittyskokeet****Dynaaminen kolmiakselikoe**

Dynaaminen (tai syklinen) kolmiakselikoe soveltuu käytettävissä olevista menetelmistä parhaiten, tosin tietyin varauksin, tierakenteen eri kerrosten materiaalien jäykkyysominaisuuksien määrittämiseen. Dynaamisella kolmiakselikokeella voidaan halutussa jännitys-, tiiveys- ja kosteustilassa määrittää materiaalin jäykkyysoinmoduuli ja Poisson -luku.

Moduulien määrittämiseen on olemassa useampia menettelytapoja. Näistä ehkä yleisimmin Suomessa käytetty on SHRP P46 -protokolla (Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils). Muita käytettyjä menetelmiä ovat CEN -standardiluonnoksen mukainen menettely ja Norjassa kehitetty menettely. Menetelmät poikkeavat periaatteessa toisistaan lähinnä kuormitustavan ja kokeissa käytettyjen jännitystilojen osalta. Kaikissa on tavoitteena mitata tunnetun jännityslisäyksen aiheuttama vaste ja käyttää mitattua vastetta jäykkyysoinmoduulin määrittämiseen.

CEN -standardiehdotus (prEN 13286-7. Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures) kuvaa kaksi periaatteeltaan erilaista menettelyä, joista toisessa (method A) myös sellipaine muuttuu aksiaalisen jännityksen muuttuessa, kun taas toisessa (method B) sellipaine on vakio ja vain aksiaalinen jännitys muuttuu. CEN -menettely soveltuu parhaiten kantavan kerroksen materiaalien testaukseen, koska jännitystasot kokeessa ovat varsin korkeat.

Muut jäykkyyden määrittämiseen käytettävissä olevat koetyypit

- Hollow cylinder -laitteisto
- Resonant column -laitteisto
- Bender element -laitteisto
- CBR-koe
- Staattinen kolmiakselikoe

LIITE 1.17(17)

Hollow cylinder, Resonant Column ja Bender Element –laitteistot soveltuvat lähinnä hienorakeisten pohjamaiden tai enintään rakeisuudeltaan suodatinhiekkä vastaavien materiaalien jäykkyysominaisuuksien määrittämiseen laitteistojen tyypillisen näytteen johdosta.

CBR –koetta käytetään edelleen Euroopassa jäykkyysoimuulin likiarvon määrittämiseen ja ehkä myös materiaalein luokitteluun. Suomessa menetelmä ei ole laajemmassa käytössä ehkä hienompien materiaalien kevytkantavuus –ominaisuuksien määrittästä lukuun ottamatta.

Staattinen kolmiakselikoe soveltuu oikein käytettynä ja instrumentoituna jäykkyysoimuulin likiarvon määrittämiseen. Mitään teknistä etua sen käyttö ei tuo, mutta laiteinvestointina staattinen kolmiakselikoe on selvästi edullisempi kuin pneumaattinen tai hydraulinen dynaaminen laite.

Laboratoriomittakaavan koetiekone

Laboratoriomittakaavan koetiekoneesta on esimerkkinä Oulun yliopiston TKT –koelaitte, jossa voidaan kuormittaa mallimittakaavassa todellisen rakenteen kopiota. Vastaavia, vähän isompia, laitteita löytyy muistakin Euroopan tutkimuslaitoksista. Näitä laitteita voidaan käyttää erilaisten ilmiöiden tutkimiseen, esim. pysyvien muodonmuutosten kertymiseen erilaisilla materiaaleilla, eri lähtötiheydessä tai vesipitoisuudessa.



## LIITE 2.1(11)

**Esimerkki sitomattomien materiaalien jännitystilasta riippuvien moduulien käytöstä**

Tässä esimerkissä on havainnollistettu tierakenteen sitomattomien materiaalien jännitystilasta riippuvien ominaisuuksien käyttöä mitoituksessa. Esimerkkinä on käytetty alunperin TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvauksessa /5/ esitettyä kuormituskestävyysmitoituksen laskentaesimerkkiä korjattavasta rakenteesta. Tehtävänä on parantaa olemassa olevaa rakennetta siten, että saadaan rakenne, joka vastaa valittua 10 vuoden mitoitusjaksoa.

Seuraavassa on esitetty lähtötiedot pääpiirteissään. Sellaiset lähtötiedot, joita suunnittelujärjestelmän esimerkissä ei ole esitetty ja joita tässä esitetyissä laskelmissa on tarvittu, on valittu käytettäviä materiaaleja kuvaavina (esim. tilavuuspainot).

**Lähtötiedot**

- Mitoitusjakson pituus on 10 vuotta.
- Keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku on 57 000.
- Pudotuspainomittaustuloksista määritetty referenssilämpötilaan 20 °C korjattu
- taipumasuppilo (taulukko 1)
- Maatutkamittaustuloksista määritetyt rakennekerrospaksuudet ja lämpötilakorjatus
- taipumasuppilosta takaisinlaskentaohjelmalla lasketut materiaalimoduulit (taulukko 2)
- Routamitoituksen tuloksena määritetty rakenteen kokonaisminimipaksuus on 1 050 mm
- Tilavuuspainot: asfaltti  $24 \text{ kN/m}^3$ , kantava ja jakava kerros  $22 \text{ kN/m}^3$ , pohjamaa  $18 \text{ kN/m}^3$
- Rakennekerrosten ja pohjamaan Poisson luku on 0.35 ja lepopaine kerroin  $K_0=0.6$

*Taulukko 1. Lämpötilakorjauksen tuloksena saatu taipumasuppilo.*

AB-lt (°C)	AB-pak (mm)	d0 ( $\mu\text{m}$ )	d200 ( $\mu\text{m}$ )	d300 ( $\mu\text{m}$ )	d450 ( $\mu\text{m}$ )	d600 ( $\mu\text{m}$ )	d900 ( $\mu\text{m}$ )	d1500 ( $\mu\text{m}$ )
20	85	544	410	331	261	218	163	113

LIITE 2.2( )

*Taulukko 2. Rakennekerrospaksuudet ja lämpötilakorjatulle taipumasupille takaisinlaskentaohjelmalla lasketut materiaalimoduulit.*

Materiaali	Kerrospaksuus (mm)	Mitoitusmoduuli (MPa)
AB	85	3730
Kantava	130	370
Jakava	690	202
Pohjamaa		85

**Olemassa oleva rakenne**

Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan nykyistä rakennetta. Tarkastelun lähtöarvona käytetään takaisinlaskennassa saatuja arvoja (taulukko 3).

*Taulukko 3. Olemassa olevan rakenteen tiedot.*

Kerros	Paksuus (mm)	Moduuli, E (MPa)	Poisson luku
AB	85	3730	0.35
Kantava	130	370	0.35
Jakava	690	202	0.35
Pohjamaa		85	0.35

Kantavan ja jakavan kerroksen materiaaleille oletetaan suunnittelujärjestelmässä alustavaan mitoitukseen esitetyt moduulin jännitystilariippuvuutta kuvaavat parametrit (taulukko 4).

*Taulukko 4. Materiaaliparametreille esitettyjä tyyppiarvoja /1/.*

	$K_1$	$K_2$
Kantava kerros	22 764	0,496
Jakava kerros	24 044	0,485

$$M_r = K_1 \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^{K_2} \quad (1)$$

missä,

$M_r$  on jäykkyysmoduuli, kPa  
 $\phi$  pääjännitysten summa, kPa ( $=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$ )  
 $\phi_0$  vertailujännitys, 1 kPa  
 $K_1, K_2$  materiaaliparametrit

Tässä esitetyt tarkastelut on suoritettu Kenlayer -monikerrosohjelmalla. Kenlayer -ohjelma on kuvattu julkaisussa /2/. Ohjelman lähtötietoina voidaan antaa moduulien jännitystilariippuvuutta kuvaavat parametrit (kaava 1). Ohjelmassa voidaan käyttää yhdysvaltalaisia tai SI-järjestelmän mukaisia yksiköitä. Esimerkki laskennan vaatimista lähtötiedoista on esitetty jäljempänä.

## LIITE 2.3(11)

Tässä tarkastelussa asfalttikerros on annettu yhtenä kerroksena. Kantava kerros on jaettu kahteen osakerrokseen ja jakava kerros kolmeen osakerrokseen. Tässä esimerkissä moduulin arvon määrittämisessä käytettävät pääjännitykset lasketaan osakerrosten keskipisteissä. Ohjelma iteroi lasketun jännitystilän perusteella annettujen jännitystilariippuvuusparametrien pohjalta osakerroksella käytettävän moduulin arvon.

Laskenta voidaan suorittaa myös esim. Bisar -ohjelmaa käyttäen, mutta käyttäjän on tällöin ensimmäisen (alkuarvoilla suoritettun) laskennan tulosten perusteella (liikennekuorman aiheuttamat jännitykset) laskettava itse pääjännitysten summa (huomioitava myös rakenteen omasta painosta aiheutuvat jännitykset) ja määritettävä seuraavassa laskennassa eri kerroksilla käytettävät moduulin arvot tämän perusteella. Tämän jälkeen iterointia on jatkettava, kunnes osakerroksella käytettävä moduulin arvo vastaa jännitystilaa.

Kenlayer -ohjelmalla laskien saadaan olemassa olevan rakenteelle taulukossa 5 esitetyt tulokset.

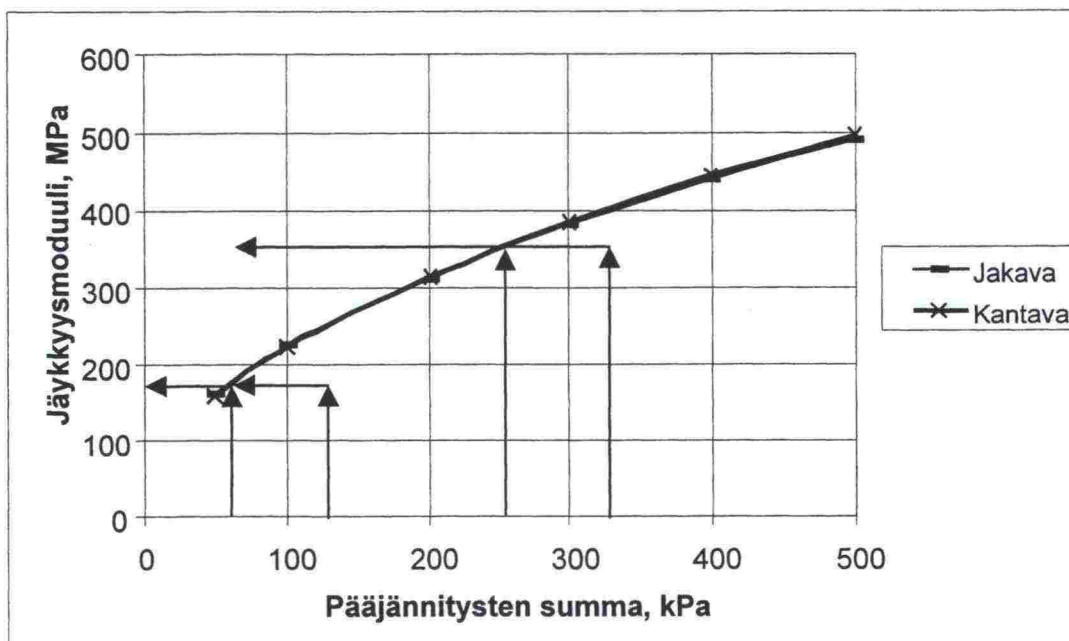
*Taulukko 5. Olemassa olevan rakenteen laskentatulokset.*

	Arvo	Huom.
Painuma (mm)	0.541	lämpötilakorjatun taipumasuppilon $d_0=0.544$ mm
Asfaltin alapinnan venymä ( $\mu\text{strain}$ )	268	
Kantavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	265	jännityslaskentapisteen arvojen keskiarvona
Kantavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	362	pääjännitysten summaa vastaava mitoitusmoduuli
Jakavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	68	jännityslaskentapisteen arvojen keskiarvona
Jakavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	183	pääjännitysten summaa vastaava mitoitusmoduuli

Kantavan ja jakavan kerrosten keskimääräisen moduulin määräytyminen pääjännityssumman perusteella on esitetty kuvassa 1. Kantavassa kerroksessa ylemmässä laskentapistessä pääjännitysten summa on luonnollisesti keskimääräistä arvoa suurempi ja myös moduulin arvo näin suurempi. Alemmassa laskentapistessä arvot ovat vastaavasti pienemmät. Myös jakavan kerroksen jännitysten laskentapistessä jännitystilasta riippuvassa materiaalisissa tilanne on vastaava. Tarkemmat jännityslaskentapistessä saadut tulokset on esitetty taulukossa 6.



LIITE 2.4(11)



Kuva 1. Kantavan ja jakavan kerroksen keskimääräinen moduuli.

Taulukko 6. Jännityslaskentapisteissä saadut tulokset (olemassa oleva rakenne).

Kerros	h, mm	Kerros-jako	Osakerros-paksuus, m	Jännitys-laskenta-pisteen z-koord., mm	Pääjännitys-tensumma, kPa	Jäykkyys-moduuli, Mpa
AB	85	1	85			3730
Kantava	130	2	65	118	316.8	396
			65	183	214.7	328
Jakava	685	3	228	329	106.9	231
			228	558	53.2	167
			228	786	43.7	151
Pohjamaa		1		1052		85

Taulukossa 6 esitettyä kerrosjakoa ja kerrosten moduuleja käyttäen saadaan Bisar-ohjelmalla painumaksi 0.550 mm (lämpötilakorjatun taipumasuppilon  $d_0=0.544$  mm) ja asfaltin alapinnan venymäksi 269  $\mu$ strain, eli käytännöllisesti katsoen sama tulos kuin Kenlayer -ohjelmalla. Ilman valmiita lähtötietoja tuloksen saaminen kuitenkin edellyttää edellä mainittua iterointia.

## LIITE 2.5 (11)

Rakenteen korjaustapa 1

Sekä routamitoituksen rakennepaksuusvaatimuksen että asfaltin alapinnan liian suuren venymän johdosta rakennetta on vahvistettava. Tässä käytetyn väsymiskriteerin mukaan asfaltin alapinnan venymän tulee olla 10 vuoden mitoitusjaksoon pyrittäessä alle 235  $\mu$ strain. Paksuuden lisäys esitetään tehtäväksi pelkästään kantavan kerroksen paksuutta lisäämällä. Valitaan alustavan rakenneratkaisun uusille rakennekerroksille materiaalimoduuli ja Poisson luku sekä vanhoille materiaaleille takaisinlaskennan tuottamat arvot (taulukko 7).

*Taulukko 7. Korjaustavan 1 tarkastelun lähtöarvot.*

Kerros	Paksuus (mm)	Jäykkyysmoduuli, E	Poisson luku
AB	80	4000	0.35
Kantava	280	300	0.35
Jakava	690	200	0.35
Pohjamaa		85	0.35

Kantavan kerroksen lisäyksellä saadaan taulukossa 8 esitetyt tulokset.

*Taulukko 8. Kantavan kerroksen paksuuden vaikutus laskentatuloksiin.*

	Arvo
Painuma (mm)	0.527
Asfaltin alapinnan venymä ( $\mu$ strain)	268
Kantavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	200
Kantavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	311
Jakavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	55
Jakavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	169

Asfaltin alapinnan venymä ylittää edelleen kriteeriksi asetetun arvon. Rakennetta tulee siis kuormituskestävyyden kannalta edelleen vahvistaa.

Rakenteen korjaustapa 2

Korjaustavassa 2 paksunnetaan sekä kantavaa kerrosta että päällystettä. Lähtöarvot on esitetty taulukossa 9.

*Taulukko 9. Korjaustavan 2 tarkastelun lähtöarvot.*

Kerros	Paksuus (mm)	Jäykkyysmoduuli, E	Poisson luku
AB	130	4000	0.35
Kantava	280	300	0.35
Jakava	690	200	0.35
Pohjamaa		85	0.35

LIITE 2.6 (11)

Päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen lisäyksellä saadaan taulukossa 10 esitetyt tulokset.

*Taulukko 10. Sidotun kerroksen ja kantavan kerroksen paksuuden vaikutus laskentatuloksiin.*

	Arvo
Painuma (mm)	0.441
Asfaltin alapinnan venymä ( $\mu\text{strain}$ )	234
Kantavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	116
Kantavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	239
Jakavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	54
Jakavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	165

Asfaltin alapinnan venymä ei ny ylitä kriteeriksi asetettua arvoa eli rakenne on kelvollinen.

Rakenteen korjaustapa 3

Oletetaan, että suunnittelun aikana on saatu lisätietoja kohteen rakennekerrosten materiaaleista. Materiaaleista on määritetty rakeisuudet ja vesipitoisuudet. Kantavan kerroksen materiaali vastaa kuvan 2 karkeampaa mursketta (KAMU2) ja jakavan kerroksen sora kuvan 3 toiseksi karkeinta soraa (JASR3). Materiaalien vesipitoisuudet ovat vastaavasti murskeella 1.8 % ja soralla 3.0 %. Ts. sanoen rakenteen materiaalit vastaavat täysin alustavaan tarkasteluun tarkoitettujen tyyppimateriaalien ominaisuuksia. Materiaalien ominaisuudet on esitetty yhteenvetona tämän raportin "Sitomattomat materiaalit" liitteissä. Moduulin jännitystilariippuvuutta kuvaavat parametrit (taulukko 11) on esitetty yksiköiltään oikeassa muodossa olevalle kaavalle (3)

$$M_r = k_1 \theta_0 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (3)$$

missä,

$\theta_0$  = vertailujännitys, 100 kPa

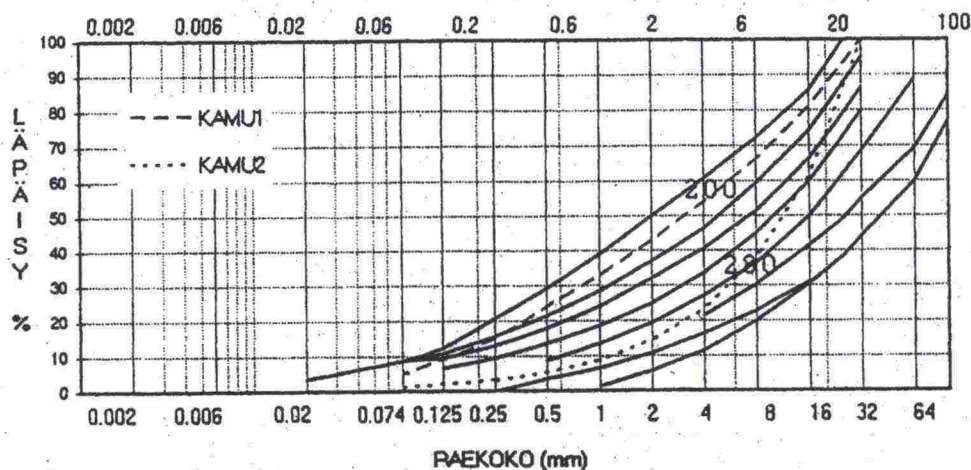
$k_1, k_2$  = materiaaliparametrit

*Taulukko 11. Kantavan ja jakavan kerroksen jännitystilariippuvuutta kuvaavat parametrit.*

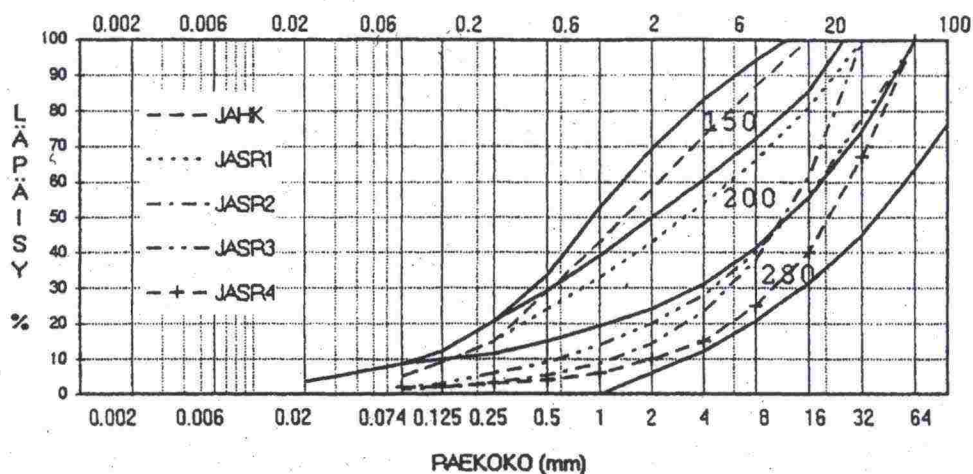
Materiaali	$k_1$	$k_2$
KAMU2	2233	0.496
JASR3	2244	0.485



## LIITE 2.7(11)



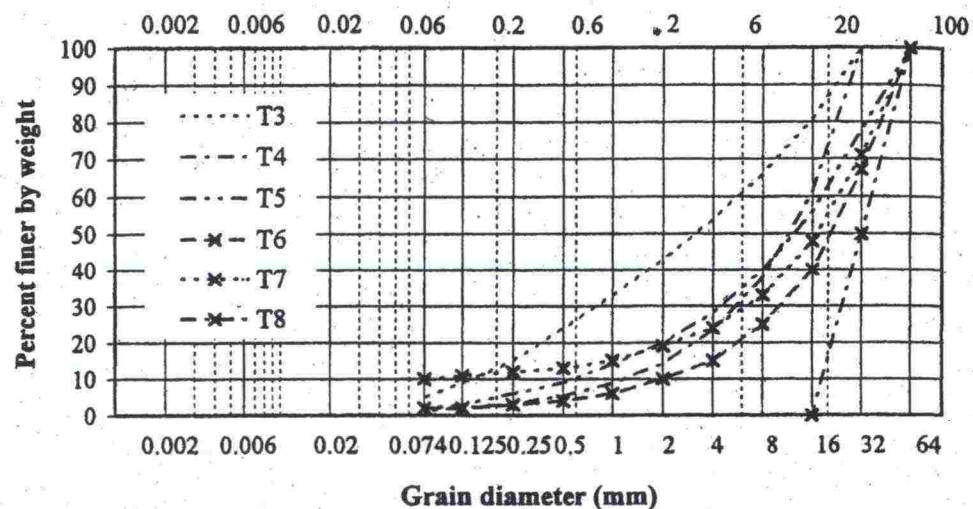
Kuva 2. Kantavan kerroksen kiviainesten ohjealue ja sille sovitetut näyttemateriaalien rakeisuuskäyrät /3/.



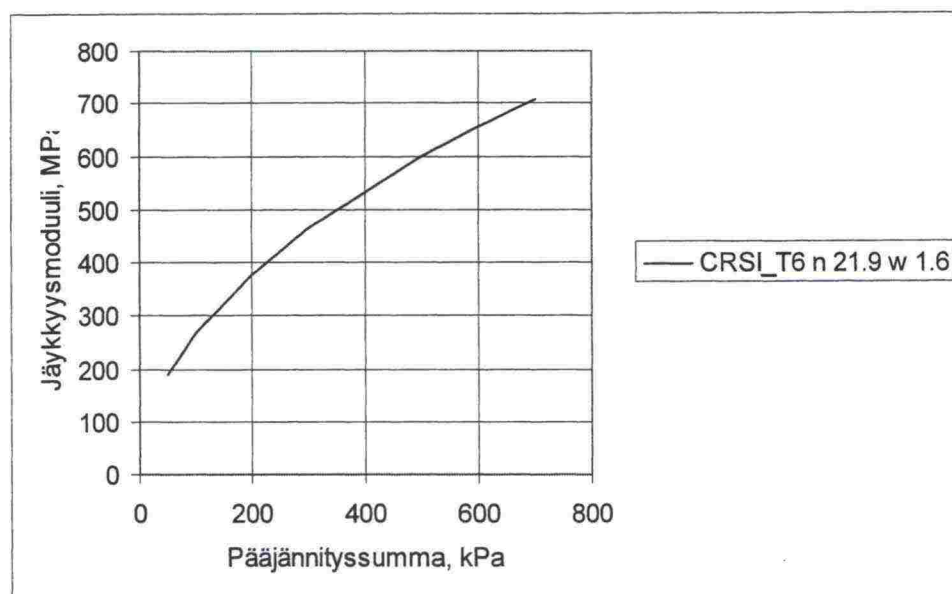
Kuva 3. Jakavan kerroksen kiviainesten ohjealue ja sille sovitetut näyttemateriaalien rakeisuuskäyrät /3/.

Suunnittelija haluaa vielä tarkastaa mahdollisuuden käyttää parempaa kantavan kerroksen materiaalia. Rakenteesta havaittujen materiaalien vesipitoisuuksien ja kohteeseen tutustumisen perusteella voidaan todeta, että kohde on hyvin kuivatettu. Suunnittelijalla on tiedossa kuvan 4 mukaisen rakeisuuden T6 omaavan materiaalin jännitystilariippuvuutta kuvaavat parametrit (kuva 5 ja taulukko 12). Koe on tehty vesipitoisuudessa  $w = 1.6 \%$ , joten hyvin kuivatetuissa olosuhteissa materiaaliparametrit ovat käyttökelpoisia. Mikäli tuloksia ei olisi valmiina käytettävissä, suunnittelija tilaisi parametrien määrittäksen ko. käyttökohteeseen vesipitoisuudessa  $2 \%$ .

LIITE 2.8 (11)



Kuva 4. Kalliomurskeiden näytteiden tavoiterakeisuudet (suomalaiset materiaalit) /4/.



Kuva 5. Kalliomurskeen moduulin riippuvuus pääjännityssummasta /4/.

Taulukko 12. Kantavan kerroksen materiaalin jännitysriippuvan moduulin parametrit. (Kaava 3)

Materiaali	$k_1$	$k_2$
CRSI_T& (w=1.65)	2588	0.52

## LIITE 2.9(11)

Vaihtamalla nyt alkuperäisessä rakenteessa pelkästään kantavan kerroksen materiaali parempaan (kantavan paksuus edelleen 130 mm ja asfaltin 85 mm) saadaan tulokseksi taulukossa 13 esitetyt tulokset.

*Taulukko 13. Kantavan kerroksen laadun vaikutus laskentatuloksiin.*

	Arvo
Painuma (mm)	0.525
Asfaltin alapinnan venymä ( $\mu\text{strain}$ )	243
Kantavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	266
Kantavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	427
Jakavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	67
Jakavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	181

Asfaltin alapinnan venymä ylittää tässä tapauksessa kriteeriksi asetetun arvon.

Mikäli kantavan kerroksen paksuus lisätään routamitoituksen edellyttämälle tasolle (kantavan kerrospaksuus 280 mm ja asfaltti 80 mm) saadaan tulokseksi taulukossa 14 esitetyt tulokset.

*Taulukko 14. Kantavan kerroksen laadun ja rakenteen paksuuden vaikutus laskentatuloksiin.*

	Arvo
Painuma (mm)	0.499
Asfaltin alapinnan venymä ( $\mu\text{strain}$ )	236
Kantavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	203
Kantavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	366
Jakavan kerroksen pääjännitysten summa $\theta$ (kPa)	54
Jakavan kerroksen mitoitusmoduuli $M_r$ (MPa)	168

Asfaltin alapinnan venymä on nyt sallitulla tasolla.

Johtopäätös: Parempaa kantavan kerroksen materiaalia käyttäen päästään vaadittuun mitoitusjaksoon ilman päällysteen paksuuden lisäystä.

Edellä esitetyllä tavalla voidaan käyttää hyväksi muitakin tässä raportissa esitettyjä sitomattomien materiaalien ominaisuuksia, valitsemalla esimerkiksi huonosti kuivatettuihin olosuhteisiin vesipitoisuudeltaan märempinä koestettuja materiaaleja tai tarkastelemalla tiiviysasteen vaikutusta lopputulokseen.



# LIITE 2.10 (11)

Lopullisessa mitoituksessa on kuitenkin aina pyrittävä käyttämään materiaaleille vallitsevat olosuhteet huomioiden määritettyjä ominaisuuksia. Määritettyjä materiaaliominaisuuksia käyttäen mitoitus ja käyttöön ennustaminen tarkentuvat. Hyvin pienissä uusissa tai korjattavissa kohteissa ominaisuuksien määrittäminen ei kuitenkaan liene taloudellisesti kannattavaa. Materiaaliominaisuuksien määrittämisen tarvetta tulee arvioida esimerkiksi sen säästön perusteella, joka ko. kohteessa saavutetaan kestoikäarvion tarkentumisella tai esimerkiksi 10...20 % eliniän pidennyksellä.

## Kenlayer -ohjelman lähtötiedot olemassa olevan rakenteen tapauksessa.

Yhdysvaltalaiset yksiköt.

Kerros	h, in	kerrosjako	Osa-kerros-paksuus, in	Jännitys-laskenta-pisteen z-koord., in	Parametri K <sub>1</sub> , psi	Parametri K <sub>0</sub>	Moduuli, psi	Tilavuus-paino, pci	Lepo-paine-kerroin K <sub>0</sub>
AB	3.35	1	3.35				540579	0.088	0.6
Kantava	5.12	2	2.56	4.63	8599	0.496	53623	0.080	0.6
			2.56	7.19	8599	0.496	53623	0.080	0.6
Jakava	26.97	3	8.99	12.96	8892	0.485	29275	0.080	0.6
			8.99	21.95	8892	0.485	29275	0.080	0.6
			8.99	30.94	8892	0.485	29275	0.080	0.6
Pohjamaa		1					12318	0.066	0.6

## SI-yksiköt.

Kerros	h, m	kerrosjako	Osakerros-paksuus, m	jännitys-laskenta-pisteen z-koord., m	Parametri K <sub>1</sub> , kPa	Parametri K <sub>0</sub>	Moduuli, kPa	Tilavuus-paino, kN/m <sup>3</sup>	Lepo-paine-kerroin K <sub>0</sub>
AB	0.085	1	0.085				3730000	24	0.6
Kantava	0.130	2	0.065	0.118	22764	0.496	370000	22	0.6
			0.065	0.183	22764	0.496	370000	22	0.6
Jakava	0.685	3	0.228	0.329	24044	0.485	202000	22	0.6
			0.228	0.558	24044	0.485	202000	22	0.6
			0.228	0.786	24044	0.485	202000	22	0.6
Pohjamaa		1					85000	18	0.6

## LIITE 2.11 (11)

**Kirjallisuus**

- /1/ Belt, J., Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformatuminen. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 15/1997. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki 1997. TIEL 4000173. 55 s. + liitt. 11 s.
- /2/ Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, 1993, 805 p.
- /3/ Kolisoja, P., TPPT-projekti M12; Loppuraportti: Sitomattomien materiaalien moduulit - Vuoden 1995 kokeet. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996, TIEL 3200402. Helsinki, 1996. 49 s. + 19 liit.
- /4/ Kolisoja, P. Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publications 223. Tampere 1997. 188 p. + 13 app.
- /5/ Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Luonnos 31.2.2000.

## 5. BITUMILLA SIDOTUT MATERIAALIT

### 5.1 Yleistä

Bitumilla sidottujen materiaalien tiedot on koottu pääasiassa seuraavista julkaisuista : Asfalttinormit 2000 (PANK ry), päällysteiden suunnittelu (Tielaitos 1997), ASTO-tutkimusohjelman loppuraportit ja TPPT-tutkimusohjelman raportit.

Asfalttimassojen laatuvaatimukset ja suhteitus sekä asfalttipäällysteiden laatuvaatimukset on esitetty yksityiskohtaisesti julkaisussa "Asfalttinormit 2000".

### 5.2 Kulutuskerroksen materiaalit

#### 5.2.1 Yleiset valintaperusteet

Pääsääntöisesti päällystetyyppi valitaan liikennemäärän mukaan. Päällystetyyppi voidaan alustavasti valita taulukon B1 mukaan.

*Taulukko 3. Päällystetyypin valinta liikennemäärän perusteella*

Liikennemäärä KVL	Päällystetyyppi
... 300	SOP
200 ... 1500	PAB-V
500 ... 2500	PAB-B
1000 ... 6000	AB
3000 ...	SMA

#### 5.2.2 Asfalttibetoni AB

Asfalttibetoni on kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seos, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja jonka sideaineen tunkeuma 25 °C:ssa on alle 330 1/10 mm.

Kulutuskerroksen asfalttibetonia (AB6 .. AB 22) käytetään kulutuskerroksen materiaalina päällystetyillä teillä lukuun ottamatta kaikkein vilkkaimmin liikennöityjä teitä. Asfalttibetonia käytetään myös tasaus-, pinta- ja paikkausmassana sekä kevyen liikenteen väylillä.

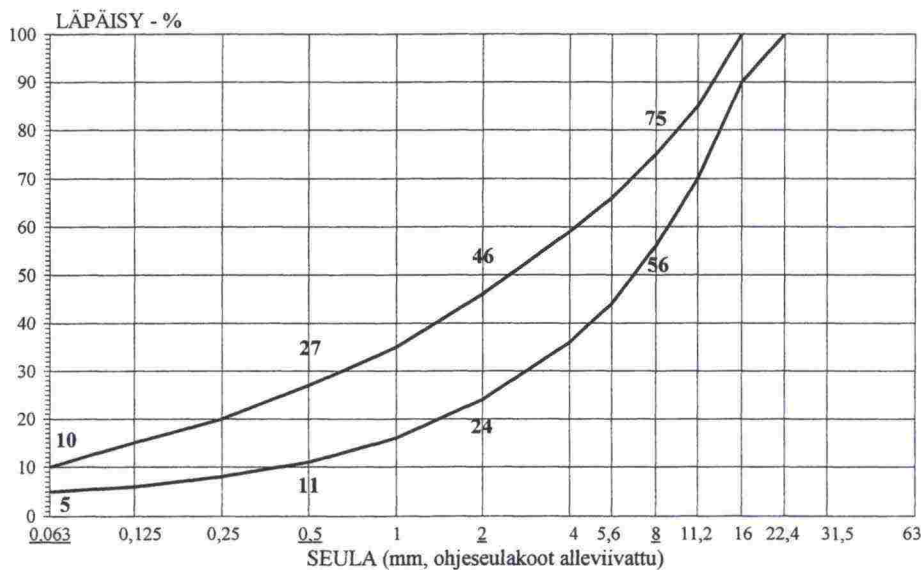
Asfalttibetonissa on oltava yli 5,6 mm kiviaineksesta kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita vähintään 40 - 75 %. Kulutuskerroksen asfalttibetonin sideaineiksi soveltuvat bitumit B35/50...B160/220 sekä kumibitumit KB65 ja KB75. (Asfalttinormit 2000)

##### 5.2.2.1 Asfalttibetoni AB16

AB16 massan yli 5,6 mm kiviaineksesta on oltava kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita 50 – 70 % riippuen suhteitusluokasta.



Massan sideaineena käytetään bitumeja B35/50...B160/220, KB65 tai KB75. Massan sideainepitoisuus on 5,0 - 6,0 massa-%



Kuva 17. AB16 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000)

Yksittäisen näytteen tyhjätila saa olla enintään 5,0 tai 6,0 tilavuus-% riippuen asfalttinormien suhteitusluokasta. Uusi, tasalaatuinen asfalttibetoni-päällyste on yleensä vettä läpäisemätöntä, jos sen tyhjätila on alle 3,0 tilavuus-%.

Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan yleensä väliltä 80 - 125 kg/m<sup>2</sup> ja suositeltava massamäärä on 100 kg/m<sup>2</sup>.

### 5.2.2.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

#### Kuluminen

Päällysteen kulumiskestävyys on nastarenkaiden käytön aiheuttaman päällysteiden urautumisen takia keskeinen päällysteen ominaisuus. Kulumiseen vaikuttavat merkittävästi monet olosuhde- ja massatekijät. Tärkeimmät olosuhdetekijät ovat liikennemäärä, liikenteen nopeus ja tienpinnan / päällysteen kosteus. Tärkeimmät massatekijät ovat kiviaineksen kulutuskestävyys ja massan suhteitus ja lisäaineet. Kiviaineksen lujuus kulumista vastaan on selvästi tärkein päällysteen kulumiseen vaikuttava tekijä.

Asfalttimassan kulumista mitataan laboratoriossa SRK-menetelmällä, PANK 4209. SRK-arvon perusteella voidaan laskea päällysteen kestoikä, kun tiedetään olosuhdetekijät.

ASTO projektin kenttätutkimuksissa todettiin AB20 päällysteen kuluvan 10 % nopeammin kuin SMA 16 päällyste. (Kurki, 1998)

Kiviaineksen lujuus- ja muoto-ominaisuudet määritetään tutkimusmenetelmillä :

- SFS-EN 933-5 Murtopintaisten rakeiden osuus karkeasta kiviaineksesta
- SFS-EN 1097-9 lujuus. Kuulamylymenetelmä.

*Taulukko 4. Päälystekiviainesten lujuusluokat (SFS-EN 1097-9).*

Lujuusluokka	I	II	III	IV
Kuulamylyarvo	≤ 7,0	≤ 10,0	≤ 14,0	≤ 19,0

*Taulukko 5. Päälystekiviainesten lujuusluokan valinta KVL:n perusteella.*

Lujuusluokka	I	II	III	IV
KVL alue, kun nopeusrajoitus > 60 km/h	> 5000	2500-5000	1500-2500	500-1500
KVL alue, < 60 km/h	> 10000	5000-10000	2500-5000	500-2500

### Deformoituminen

Päälysteen urautuminen johtuu päälysteen jälkitiivistymisestä ja plastisista muodonmuutoksista. Deformaatioura syntyy, kun raskas liikenne pääsee uudelle päälysteelle liian aikaisin ennen päälysteen jäykistymistä ja kesäisten hellepäivien aikana.

Deformoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat raskaiden ajoneuvojen lukumäärä ja paino, kuumien kesäpäivien lukumäärä, päälysteen massatyypin ja sideaineen penetraatio ja lisäaineet.

Päälysteen deformaatiokestävyys määritetään asfalttipäälysteestä saatuista laatoista tai levitetyn massan valmistuksen yhteydessä tehdyistä koelaatoista pyöräurituskokeella (PANK 4205) tai valmiista päälysteestä poratuista näytteistä jaksollisella virumiskokeella (PANK 4208). Taulukossa B4 on esitetty pyöräurituskokeessa uran loppusyvyyden raja-arvot deformaatioluokittain.

ASTO koeteillä AB20 päälyste deformoitui 20 % enemmän kuin SMA 16 päälyste. (Kurki, 1998)

Taulukko 6. Asfalttimassojen deformaatioluokat (Asfalttinormit 2000).

Deformaatioluokka	Uran syvyys pyörärituskokeessa (PANK 4205)	
	Ohjeellinen alkusyvyys	Loppusyvyys
I	≤ 1,0 mm	≤ 4,0 mm
II	≤ 1,5 mm	≤ 8,0 mm
III	≤ 2,0 mm	≤ 12,0 mm
IV	≤ 3,0 mm	≤ 16,0 mm

Väsyminen

Päällysteen väsymisellä tarkoitetaan toistuvien liikennekuormitusten aikaan saamaa päällysteen kestävyys heikkenemistä. Heikkenemiseen vaikuttavat olosuhteiden lisäksi materiaali- ja mitoitus tekijät. Asfaltin väsyminen etenee asfalttikerroksen alapinnasta yläpintaan, aluksi hiushalkeamina, myöhemmin murtumina. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ja halkeamien lisääntyessä alenee ko. kerroksen jäykkyys.

Asfaltin väsytlaitteella (PANK 4206) voidaan laboratoriossa simuloida päällysteeseen kohdistuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulokset esitetään väsymissuorana ja väsymisyhtälönä.

Väsymisyhtälö on muotoa

$$N = a \cdot (1/\varepsilon)^b \quad (10)$$

missä

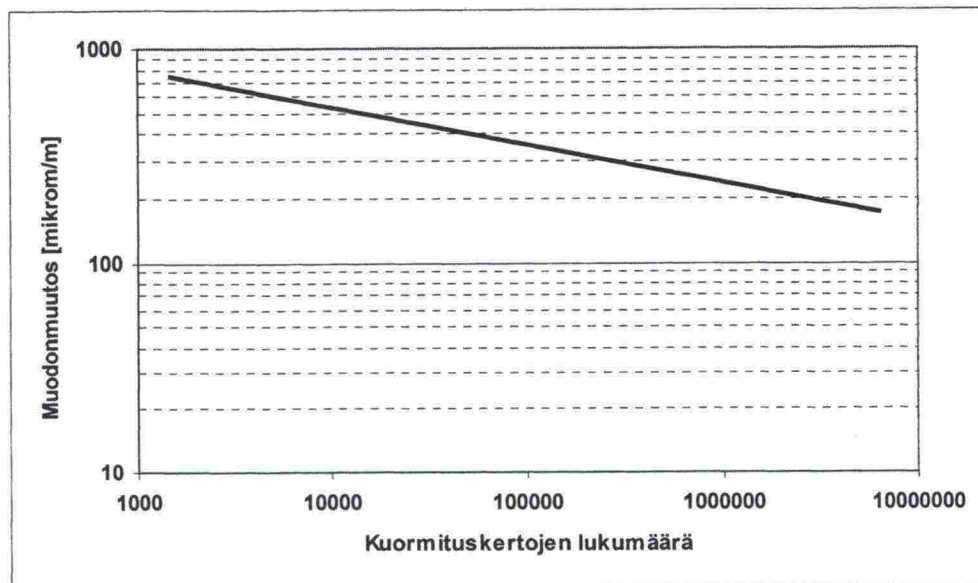
N on kuormituskertaluku  
 $\varepsilon$  suhteellinen muodonmuutos ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )  
a,b materiaalivakioita

Väsymislaitteella mitattava kuormituskertaluku ei ole tierakenteen todellisuudessa kestävä kuormituskertaluku vaan materiaali kohtainen ominaisuus.

Taulukko 7. AB20 B70/100 massan materiaalivakiot (kaava 10) väsytykskokeessa, voimaohjattu koe. (Spoof, 1992)

Log a	b
19,4	5,6





Kuva 18. AB20 B70/100 päällysteen väsymissuora.

#### Jäykkyyssmoduuli

Toistuvat liikennekuormitukset aiheuttavat sekä kimmoisia että plastisia muodonmuutoksia. Tietyn kuormituskertamäärän jälkeen jännitys-muodonmuutossykli vakiintuu ja muodonmuutokset ovat lähes kimmoisia. Tätä tilaa kuvataan jäykkyyssmoduulilla. Jäykkyyssmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa.

Taulukko 8. AB20 jäykkyyssmoduulien arvot eri testauslämpötilassa.

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C, MPa	+ 15 °C, MPa	+ 25 °C, MPa	Lähde
B50/70	11000	6100	3100	Laboratorio
B70/100	9600	5300	2700	Laboratorio
B100/150	7600	4200	2200	Laboratorio
B160/220	6500	3600	1300	TPPT koetiet

#### Poisson luku

Poisson luku asfalttikonkalle vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

#### Vedenkestävyys

Asfalttimassan vedenkestävyys on kiviaineksen ja sideaineen välisen tartunnan vedenkestävyys. Vedenkestävyys tutkitaan halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä PANK 4301. Kokeessa käytetään samaa kiviainesta ja bitumia kuin valmiissa päällysteessä. Tarttuvuuslukuvaatimus AA11-massalle on 60 % ja suhteituksen mukaiselle massalle 80 %.

### Pakkasenkestävyys

Alhaisissa lämpötiloissa päällysteeseen syntyy talvella poikkisuuntaisia halkeamia, kun päällyste kutistuu. Pakkasenkestävyyteen vaikuttaa eniten käytettävä sideainelaatu. Pehmeä bitumi kestää päällysteen halkeamatta alhaisia lämpötiloja paremmin kuin kova bitumi. Kumibitumin käyttö sideaineena parantaa päällysteen pakkasenkestävyyssominaisuuksia. Pakkasenkestävyyttä suunniteltaessa pitää huomioida deformaatio-kestävyys, joka on yleensä pakkasenkestävyyttä merkittävämpi.

### Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

## **5.2.3 Kivimastiksiasifaltti SMA**

SMA on asfaltti, jonka pääosan muodostaa karkea, lähes tasarakeinen murskattu kiviaines. Karkean aineksen muodostaman kiviainesrungon tyhjätilan täyttää stabiloitu mastiksi.

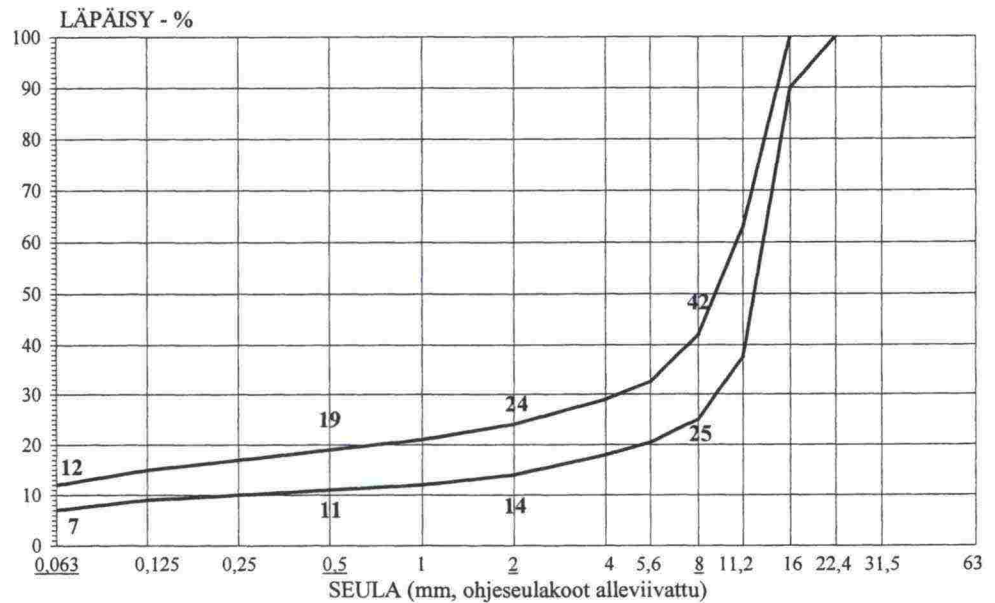
Kivimastiksiasifalttia (SMA) käytetään kulutuskerroksen materiaalina vilkkaasti liikennöidyillä teillä, koska SMA kestää paremmin kuin asfalttibetoni nastarenkaiden aiheuttamaa kulutusta. Korkeamman hinnan takia SMA:ta ei käytetä vähäliikenteisillä teillä.

Kivimastiksiasifalttien (SMA) kiviaineksesta on kalliomursketta vähintään 85 %. Kivimastiksiasifaltin sideaineiksi soveltuvat bitumit B35/50... B100/150 tai kumibitumit KB65 sekä KB75. Kivimastiksiasifaltissa käytetään stabiloivana lisäaineena selluloosakuitua ja/tai luonnonasfalttia. (Asfalttinormit 2000)

### **5.2.3.1 SMA 16**

SMA16 massan kiviaineksesta on oltava kalliomursketta vähintään 85 %.

- Sideaineena käytetään bitumia B35/50...B100/150, KB65, KB75
- Sideainepitoisuus on 6,0 - 7,0 massa-%
- Lisäaineen osuus on 0,3 – 0,5 massa-%



Kuva 19. SMA16 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000)

Yksittäisen näytteen tyhjätila saa olla enintään 5,0 tai 6,0 tilavuus-% riippuen asfalttinormien mukaisesta suhteitusluokasta. Uusi, tasalaatuinen päällyste on yleensä vettä läpäisemätöntä, jos sen tyhjätila on alle 3 tilavuus-%.

Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan yleensä väliltä 80 - 125 kg/m<sup>2</sup>. Suositeltava massamäärä on 100 kg/m<sup>2</sup>.

### 5.2.3.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

#### Kuluminen

Päällysteen kulumiskestävyys on nastarenkaiden käytön aiheuttaman päällysteiden urautumisen takia keskeinen päällysteen ominaisuus. Kulumiseen vaikuttavat merkittävästi monet olosuhde- ja massatekijät. Tärkeimmät olosuhdetekijät ovat liikennemäärä, liikenteen nopeus ja tienpinnan / päällysteen kosteus. Tärkeimmät massatekijät ovat kiviaineksen kulutuskestävyys ja massan suhteitus ja lisäaineet. Kiviaineksen lujuus kulumista vastaan on selvästi tärkein päällysteen kulumiseen vaikuttava tekijä.

Asfalttimassan kulumista mitataan päällysteen suunnittelussa SRK-menetelmällä, PANK 4209. SRK-arvon perusteella voidaan laskea päällysteen kestoikä, kun tiedetään olosuhdetekijät.

ASTO projektin kenttätutkimuksissa todettiin AB20 päällysteen kuluvan 10 % nopeammin kuin SMA 16 päällyste. (Asfalttinormit 2000)



### Deformoituminen

Päällysteen urautumisella tarkoitetaan päällysteen jälkitiivistymistä ja plastisia muodonmuutoksia. Deformaatioura syntyy, kun raskas liikenne pääsee uudelle päällysteelle liian aikaisin ennen päällysteen jäykistymistä ja kesäisten hellepäivien aikana.

Deformoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat raskaiden ajoneuvojen lukumäärä ja paino, kuumien kesäpäivien lukumäärä, päällysteen massatyypin ja sideaineen penetraatio ja lisäaineet.

Päällysteen deformaatiokestävyys määritetään asfalttipäällysteestä saatuista laatoista tai levitetyn massan valmistuksen yhteydessä tehdyistä koelaatoista pyöräurituskokeella (PANK 4205) tai valmiista päällysteestä poratuista näytteistä jaksollisella virumiskokeella (PANK 4208). Taulukossa B7 on esitetty pyöräurituskokeessa uran loppusyvyyden raja-arvot deformaatioluokittain.

ASTO koeteillä AB20 päällyste deformoitui 20 % enemmän kuin SMA 16 päällyste. (Asfalttinormit 2000)

*Taulukko 9. Asfalttimassojen deformaatioluokat (Asfalttinormit 2000).*

Deformaatioluokka	Uran syvyys pyöräurituskokeessa (PANK 4205)	
	Ohjeellinen alkusyvyys	Loppusyvyys
I	≤ 1,0 mm	≤ 4,0 mm
II	≤ 1,5 mm	≤ 8,0 mm
III	≤ 2,0 mm	≤ 12,0 mm
IV	≤ 3,0 mm	≤ 16,0 mm

### Väsyminen

Päällysteen väsymisellä tarkoitetaan toistuvien liikennekuormitusten aikaansaamaa päällysteen kestävyysheikkenemistä. Heikkenemiseen vaikuttavat olosuhteiden lisäksi materiaali- ja mitoitus tekijät. Asfaltin väsyminen etenee asfalttikerroksen alapinnasta yläpintaan, aluksi hiushalkeamina, myöhemmin murtumina. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ja halkeamien lisääntyessä alenee ko. kerroksen jäykkyys.

Asfaltin väsytyslaitteella (PANK 4206) voidaan laboratoriossa simuloida päällysteeseen kohdistuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulokset esitetään väsymissuorana ja väsymisyhtälönä.

Väsymisyhtälö on muotoa :

$$N = a \cdot (1/\varepsilon)^b, \quad (11)$$

missä

N on kuormituskertaluku

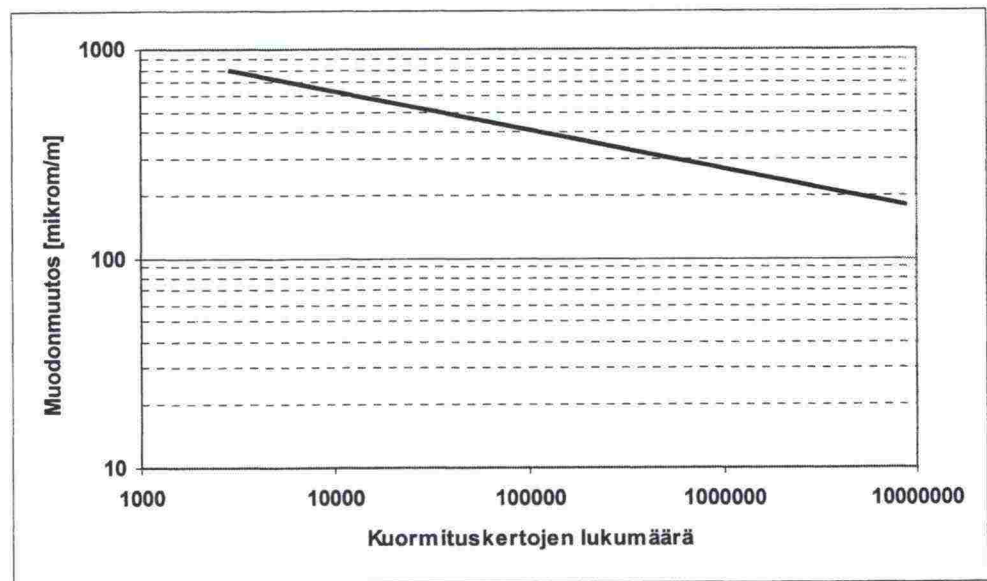
$\varepsilon$  suhteellinen muodonmuutos ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

a,b materiaaliveikkeitä

Väsymislaitteella mitattava kuormituskertaluku ei ole tierakenteen todellisuudessa kestävä kuormituskertaluku vaan materiaali-kohtainen ominaisuus.

Taulukko 10. SMA16 B70/100 massan materiaalivakiot (kaava 11) väsytyksko-  
keessa, voimaohjattu koe. (Spoof, 1992)

log a	b
19,0	5,4



Kuva 20. SMA 16 B70/100 päällysteen väsymissuora.

### Jäykkyysmoduuli

Toistuvat liikennekuormitukset aiheuttavat sekä kimmoisia että plastisia muodonmuutoksia. Tietyn kuormituskertamäärän jälkeen jännitys-  
muodonmuutossykli vakiintuu ja muodonmuutokset ovat lähes kimmoisia. Tätä tilaa kuvataan jäykkyysmoduulilla. Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtö-  
tona päällysrakenteen analyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään  
dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204

Taulukko 11. SMA16 jäykkyysmoduulien arvot eri testauslämpötilassa.

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C, MPa	+ 15 °C, MPa	+ 25 °C, MPa	Lähde
B50/70	10900	6000	3000	Laboratorio
B70/100	9500	5200	2600	TPPT koetiet
B100/150	7500	4100	2100	TPPT koetiet

### Poisson luku

Poisson luku asfalttibetonille vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

### Vedenkestävyys

Asfalttimassan vedenkestävyys on kiviaineksen ja sideaineen välisen tartunnan vedenkestävyys. Vedenkestävyys tutkitaan halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä PANK 4301. Kokeessa käytetään samaa kiviainesta ja bitumia kuin valmiissa päällysteessä. Tarttuvuusluokuvaatimus AA11-massalle on 60 % ja suhteituksen mukaiselle massalle 80 %.

### Pakkasenkestävyys

Alhaisissa lämpötiloissa päällysteeseen syntyy talvella poikkisuuntaisia halkeamia, kun päällyste kutistuu. Pakkasenkestävyyteen vaikuttaa eniten käytettävä sideainelaatu. Pehmeä bitumi kestää paremmin alhaisia lämpötiloja päällysteen halkeamatta kuin kova bitumi. Kumibitumin käyttö sideaineena parantaa päällysteen pakkasenkestävyysominaisuuksia. Pakkasenkestävyyttä suunniteltaessa pitää huomioida deformaatio-kestävyys, joka on yleensä pakkasenkestävyyttä merkittävämpi.

### Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

## **5.2.4 Pehmeä asfalttibetoni PAB-B**

Pehmeä asfalttibetoni on kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seos, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja jonka sideaineen tunkeuma 25 °C:ssa on yli 330 (mittayksikkönä 1/10 mm).

Pehmeää asfalttibetonia (PAB-B) käytetään kulutuskerroksen materiaalina kevytpäällysteisillä teillä, kun KVL on 500 – 2500 ajoneuvoa / vrk.

Sideaineena käytetään bitumia B330/430, B500/650, B650/900 tai niistä tehtyä emulsiota. PAB-B:n kiviaines kuumennetaan tai lämmitetään ennen massan sekoitusta. (Asfalttinormit 2000)

### **5.2.4.1 PAB-B 16**

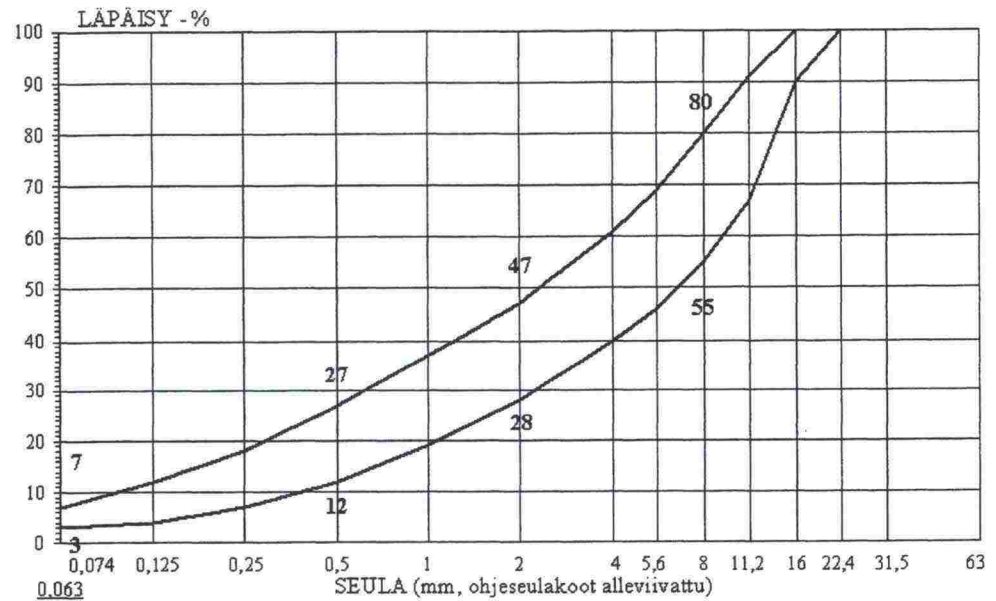
PAB-B 16 massan kiviaineksena käytetään mursketta, jonka rakeisuus on 0/16 mm.

Sideaineena käytetään bitumia B330/440...B650/900 tai niistä tehtyä emulsiota.

Sideainepitoisuus on 3,9 – 4,4 massa-%.

Lisäaineena käytetään tartuketta 0,5 % sideaineen massasta (tarvittaessa).





Kuva 21. PAB-B16 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000)

Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan yleensä väliltä 80 - 100 kg/m<sup>2</sup>

#### 5.2.4.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

##### Halkaisuvetolujuus

Pehmeiden asfalttibetonipäällysteiden stabiileetti määritetään halkaisuvetolujuuskokeella (PANK 4202). Halkaisuvetolujuuskokeessa sylinterinmuotoista koekappaletta kuormitetaan pituusakselin suuntaisessa tasossa kuormitusnopeudella 50 mm/min, kunnes saavutetaan halkeamisen aiheuttama murtokuorma. Halkaisuvetolujuuden on pehmeillä asfalttibetoni päällysteillä todettu kuvaavan hyvin päällysteen lujuutta, kiinteyttä ja koossapysyvyyttä.

##### Vedenkestävyys

Vedenkestävyys tutkitaan halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä (PANK 4301). Asfalttimassan vedenkestävyys on märkinä ja kuivana säilytettyjen tiivistettyjen asfalttinäytteiden halkaisuvetolujuuksien suhde. Halkaisuvetolujuuksien suhdetta kutsutaan tarttuvuusluvuksi.

##### Tarttuvuusluku

$$Q = \sigma_{\text{märkä}} / \sigma_{\text{kuiva}} \quad (12)$$

missä

$\sigma_{\text{märkä}}$  on märkinä puristettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien ka.

$\sigma_{\text{kuiva}}$  on kuivina puristettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien ka.

PAB-B massalle tarttuvuuslukuvaatimus on yli 60 % suhteituksen mukaisella massalla.

#### Jäykkyysmoduuli

Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa.

PAB-B 16 jäykkyysmoduulin arvo on +15 °C lämpötilassa noin 2000 – 2500 MPa. Sideaine on käytetty B650/900. Määrittäminen on tehty kolmiakselikokeena, missä sellipaine on nolla. PAB-B materiaalia ei ole testattu riittävästi tarkempien moduulitietojen selvittämiseksi.

#### Poisson luku

Poisson luku asfalttibetonille vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

#### Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

### **5.2.5 Pehmeä asfalttibetoni PAB-V**

Pehmeä asfalttibetoni on kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seos, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja jonka sideaineen tunkeuma 25 °C:ssa on yli 330 (yksikkönä 1/10 mm).

Pehmeää asfalttibetonia (PAB-V) käytetään kulutuskerroksen materiaalina kevytpäällysteisillä teillä, kun KVL on 200 – 1500 ajoneuvoa / vrk.

Sideaineena käytetään bitumia V1500, V3000 tai niistä tehtyä emulsiota. PAB-V:n kiviaines voi olla lämmitettyä tai kylmää. Sideaineen ja kiviaineksen välisen tartunnan parantamiseksi käytetään tarvittaessa tartuketta.

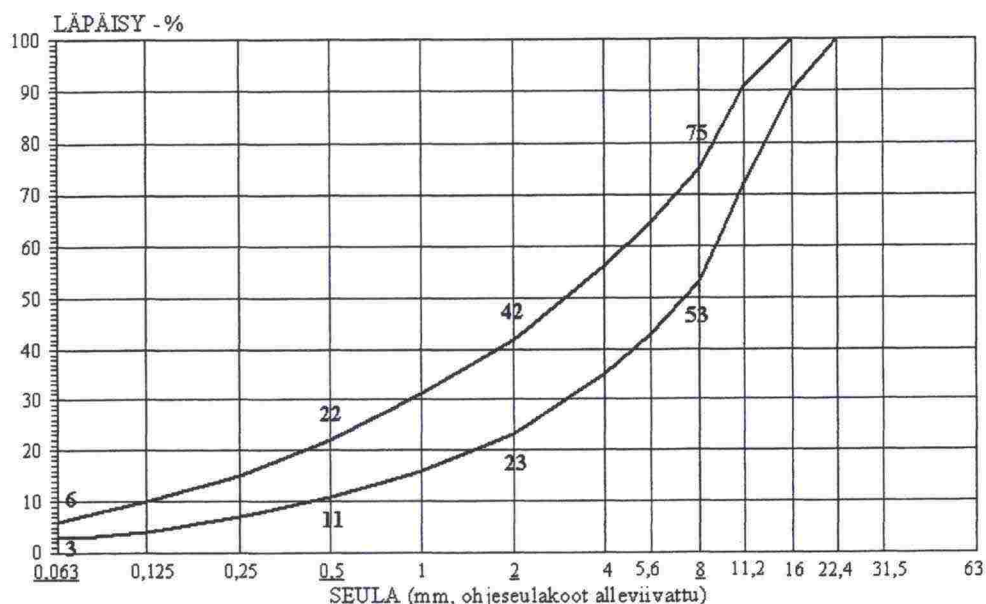
#### **5.2.5.1 PAB-V 16**

PAB-V 16 massan kiviaines on mursketta, jonka rakeisuus on 0/16 mm.

Massan sideaineena käytetään bitumia V1500, V3000 tai niistä tehtyä emulsiota.

Päällystemassan sideainepitoisuus on 3,1 – 3,6 massa-%.

Lisäaineena käytetään tarvittaessa tartuketta 0,4 - 1,3 % sideaineen massasta. (Asfalttinormit 2000)



Kuva 22. PAB-V16 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000)

Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan yleensä väliltä 80 - 100 kg/m<sup>2</sup>.

### 5.2.5.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

#### Halkaisuvetolujuus

Pehmeiden asfalttibetonipäällysteiden stabiiteetti määritetään halkaisuvetolujuuskokeella (PANK 4202). Halkaisuvetolujuuskokeessa sylinterinmuotoista koekappaletta kuormitetaan pituusakselin suuntaisessa tasossa kuormitusnopeudella 50 mm/min, kunnes saavutetaan halkeamisen aiheuttama murtokuorma. Halkaisuvetolujuuden on pehmeillä asfalttibetonipäällysteillä todettu kuvaavan hyvin päällysteen lujuutta, kiinteyttä ja koossapysyvyyttä.

#### Vedenkestävyys

PAB-V päällystemassalle määritetään vedenkestävyys MYR-menetelmällä (PANK 4304). MYR-kokeessa tutkitaan 1000 g näytettä, jonka massa on 1000 g ja sekoituksesta on kulunut yksi tunti. Näyte laitetaan mittalasiin ja sen päälle kaadetaan 1500 ml vettä. Mittalasi suljetaan ja käännetään ylösalasin kymmenen kertaa. Lasi lasketaan pöydälle minuutin ajaksi, minkä jälkeen toistetaan kymmenen ylös-alas-liikkeen sarja. Veteen irronneen hienoaineksen ja sideaineen määrä selvitetään suodattamalla vesi ja kuivaamalla suodatinpussi. Tarttuvuusarvon ilmoittaa kuivatun hienoaineksen ja sideaineen määrän massan grammoina.

Asfalttinormien mukainen MYR-arvovaatimus on alle 2,0 g (PANK 4304)



### Jäykkyysmoduuli

Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa.

PAB-V 16 jäykkyysmoduulin arvo on +15 °C lämpötilassa noin 1500 – 2000 MPa. Sideaineena käytetään V1500 tai V3000. Määritys on tehty kolmiaksaalikoikeena, missä sellipaine on nolla. PAB-V materiaalia ei ole testattu riittävästi tarkempien moduulitietojen selvittämiseksi.

### Poisson luku

Poisson luku asfalttibetonille vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

### Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

## **5.3 Sidekerroksen materiaalit**

### **5.3.1 Sidekerroksen asfalttibetoni ABS**

Asfalttibetoni on kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seos, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja jonka sideaineen tunkeuma 25 °C:ssa on alle 330 (yksikkönä 1/10 mm).

Sidekerroksen asfalttibetonia (ABS 16 .. ABS 22) käytetään tarvittaessa kulutuskerroksen ja kantavan kerroksen välisenä materiaalina kestopäällysteisillä teillä. ABS:n rakeisuuskäyrä on yleensä vastaavan maksimirakoon omaavan AB:n alarajalla ja sideainepitoisuus ja sideaineen tunkeuma riittävän pieniä jäykän kerroksen aikaansaamiseksi.

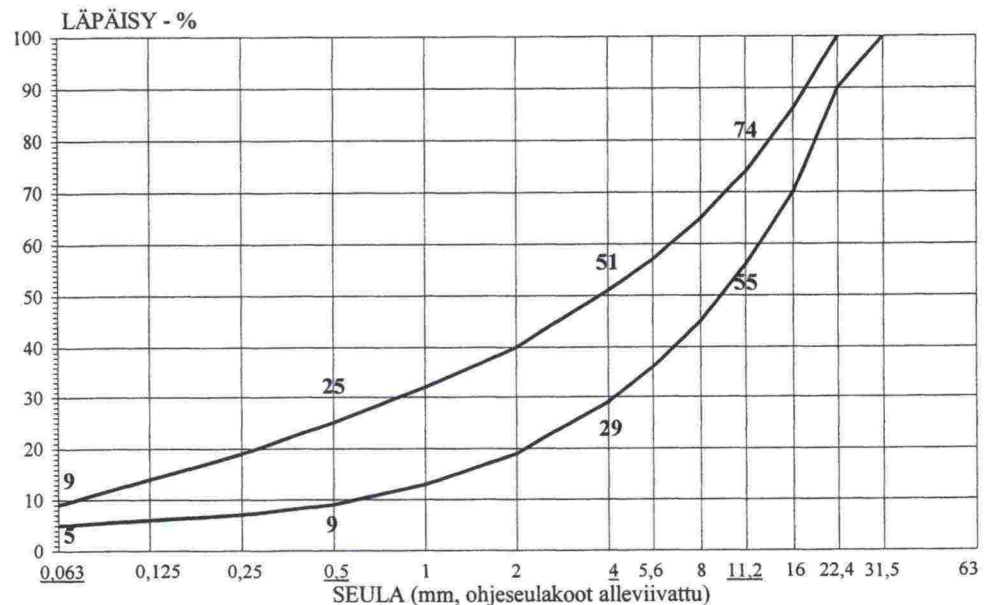
Asfalttibetonissa on oltava yli 5,6 mm kiviaineksesta kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita vähintään 70 - 75 %. Kulutuskerroksen asfalttibetonin sideaineiksi soveltuvat bitumit B35/50...B100/150 sekä kumibitumit KB65 ja KB75. Massa suhteutetaan aina asfalttinormien suhteistusluokan A mukaisesti. (Asfalttinormit 2000)

#### **5.3.1.1 ABS 22**

ABS 22 massan yli 5,6 mm kiviaineksesta on oltava kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita vähintään 75 %

Sideaineena käytetään bitumia B35/50...B100/150, KB65, KB75

Sideainepitoisuus on yleensä 4,3 - 5,3 massa-%.



Kuva 23. ABS 22 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000)

Yksittäisen näytteen tyhjättila saa olla enintään 5,0 tilavuus-%

Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan väliltä 110 - 150 kg/m<sup>2</sup>. Suositeltava massamäärä on 125 kg/m<sup>2</sup>.

### 5.3.1.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

#### Deformoituminen

Päällysteen urautumisella tarkoitetaan päällysteen jälkitiivistymistä ja plastisia muodonmuutoksia. Deformaatioura syntyy, kun raskas liikenne pääsee uudelle päällysteelle liian aikaisin ennen päällysteen jäykistymistä ja kesäisten hellepäivien aikana. Deformoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat raskaiden ajoneuvojen lukumäärä ja paino, kuumien kesäpäivien lukumäärä, päällysteen massatyyppi ja sideaineen penetraatio ja lisäaineet.

Päällysteen deformaatiokestävyys määritetään asfalttipäällysteestä saatuista laatoista tai levitetyn massan valmistuksen yhteydessä tehdyistä koelaatoista pyöräurituskokeella (PANK 4205) tai valmiista päällysteestä poratuista näytteistä jaksollisella virumiskokeella (PANK 4208). Taulukossa B10 on esitetty pyöräurituskokeessa uran loppusyvyyden raja-arvot deformaatioluokittain.

Taulukko 12. Asfalttimassojen deformaatioluokat.

Deformaatioluokka	Uran syvyys pyöräurituskokeessa (PANK 4205)	
	Ohjeellinen alkusyvyys	Loppusyvyys
I	≤ 1,0 mm	≤ 4,0 mm
II	≤ 1,5 mm	≤ 8,0 mm
III	≤ 2,0 mm	≤ 12,0 mm
IV	≤ 3,0 mm	≤ 16,0 mm

Väsyminen

Analyttisessä tierakenteen mitoituksessa tarkastellaan alimman sidotun kerroksen väsymisominaisuuksia. Sidekerroksen asfalttibetonia, ABS käytetään kulutuskerroksen ja kantavan kerroksen asfalttibetonin välissä ja siitä syystä sen sidekerroksen väsymisominaisuuksia ei tarkastella mitoituksessa.

Jäykkyysmoduuli

Toistuvat liikennekuormitukset aiheuttavat sekä kimmoisia että plastisia muodonmuutoksia. Tietyn kuormituskertamäärän jälkeen jännitysmuodonmuutossykli vakiintuu ja muodonmuutokset ovat lähes kimmoisia. Tätä tilaa kuvataan jäykkyysmoduulilla. Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa.

*Taulukko 13. ABS 22 jäykkyysmoduulien arvot eri testauslämpötilassa. Gilsoniittia on 17 % sideaineesta.*

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C, MPa	+ 15 °C, MPa	+ 25 °C, MPa	Lähde
B50/70 Gilsoniitti 17%	14200	10600	6200	TPPT koetiet
B70/100 Gilsoniitti 17%	14000	10400	6000	TPPT koetiet

Poisson luku

Poisson luku asfalttibetonille vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

Vedenkestävyys

Asfalttimassan vedenkestävyys on kiviaineksen ja sideaineen välisen tartunnan vedenkestävyys. Vedenkestävyys tutkitaan halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä PANK 4301. Kokeessa käytetään samaa kiviainesta ja bitumia kuin valmiissa päällysteessä. Tarttuvuusluokuvaatimus AA11-massalle on 60 % ja suhteituksen mukaiselle massalle 80 %.

Pakkasenkestävyys

Alhaisissa lämpötiloissa päällysteeseen syntyy talvella poikkisuuntaisia halkeamia, kun päällyste kutistuu. Pakkasenkestävyyteen vaikuttaa eniten käytettävä sideainelaatu. Pehmeä bitumi kestää paremmin päällysteen halkeamatta alhaisia lämpötiloja kuin kova bitumi. Kumibitumin käyttö sideaineena parantaa päällysteen pakkasenkestävyysominaisuuksia. Pakkasenkestävyyttä suunniteltaessa pitää huomioida deformaatio-kestävyys, joka on yleensä pakkasenkestävyyttä merkittävämpi.



### Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

## **5.4 Kantavan kerroksen materiaalit**

### **5.4.1 Asfalttibetoni ABK**

Asfalttibetoni on kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seos, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja jonka sideaineen tunkeuma 25 °C:ssa on alle 330 1/10 mm.

Kantavan kerroksen asfalttibetonia (ABK 16 .. ABK 32) käytetään kantavan kerroksen materiaalina kestopäälysteisillä teillä. ABK:n rakeisuuskäyrä on yleensä vastaavan maksimiraekoon omaavan AB:n alarajalla. Sideaine- ja hienoainespitoisuus on pienempi kuin kulutuskerroksen asfalttibetonilla. Sideaine valitaan tunkeumaltaan pieneksi ottaen huomioon deformaatiovaatimukset.

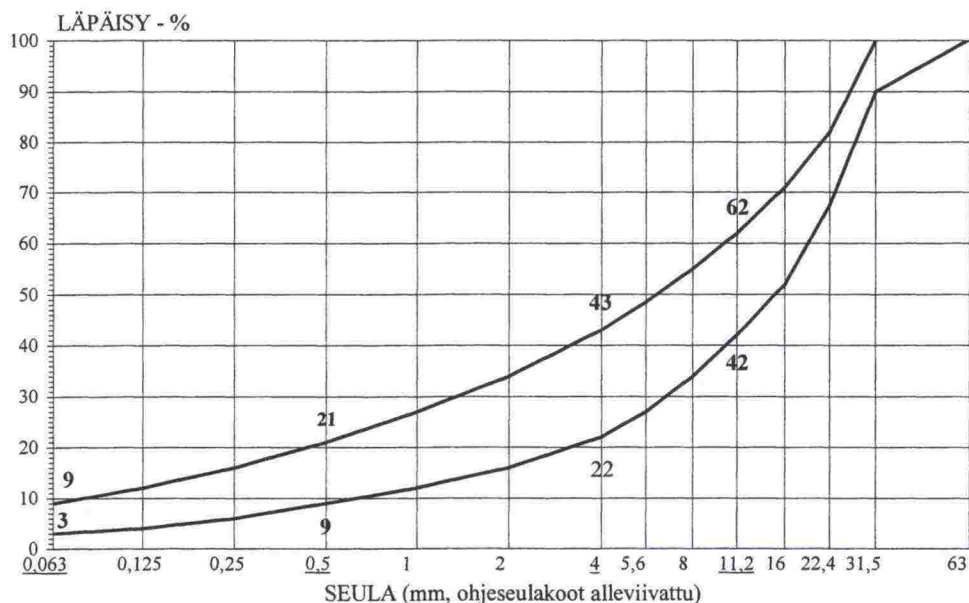
Asfalttibetonissa on oltava yli 5,6 mm kiviaineksesta kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita vähintään 60 - 75 %. Kantavan kerroksen asfalttibetonin sideaineiksi soveltuvat bitumit B20/30...B160/220 sekä kumibitumit KB65 ja KB75

#### **5.4.1.1 ABK 32**

ABK 32 massan yli 5,6 mm kiviaineksesta on oltava kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita 60 - 75 % riippuen asfalttinormien suhteitusluokasta.

Massan sideaineena käytetään bitumia B20/30...B160/220, KB65 tai KB75.

Massan sideainepitoisuus on 3,8 - 4,8 massa-%.



Kuva 24. ABK 32 massan rakeisuusalue. (Asfalttinormit 2000).

Yksittäisen näytteen tyhjätila saa olla enintään 8,0 tilavuus-%. Vakiopaksuisen laatan massamäärä valitaan väliltä 160 - 300 kg/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.1.2 Toiminnalliset ominaisuudet ja mitoitusparametrit

##### Deformoituminen

Päällysteen deformaatiokestävyys tarkoitetaan urautumista, joka johtuu päällysteen jälkitiivistymisestä ja plastisista muodonmuutoksista. Deformoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat raskaiden ajoneuvojen lukumäärä ja paino, kuumien kesäpäivien lukumäärä, päällysteen massatyyppi ja sideaineen penetraatio ja lisäaineet.

Päällysteen deformaatiokestävyys määritetään asfalttipäällysteestä saatuista laatoista tai levitetyn massan valmistuksen yhteydessä tehdyistä koelautoista pyöräurituskokeella (PANK 4205) tai valmiista päällysteestä poratuista näytteistä jaksollisella virumiskokeella (PANK 4208).

Pyöräurituskokeen koestuslämpötila on 30 °C, kuormitus 1000 kg ja laatan ylityskertojen lukumäärä 14000. TPPT projektissa tuloksiksi saatiin ABK 25 päällystelaatalle (Apilo 1996) :

Alkutiivistyminen	2,5 mm
Uran loppusyvyys	5,0 mm

Deformoitumisesta aiheutuva ura on 2,5 mm (5,0 - 2,5)

### Väsyminen

Päällysteen väsymisellä tarkoitetaan toistuvien liikennekuormitusten aikaansaamaa päällysteen kestävyysheikkenemistä. Heikkenemiseen vaikuttavat olosuhteiden lisäksi materiaali- ja mitoituskijät. Asfaltin väsyminen etenee asfalttikerroksen alapinnasta yläpintaan, aluksi hiushalkeamina, myöhemmin murtumina. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ja halkeamien lisääntyessä alenee ko. kerroksen jäykkyys.

Asfaltin väsytyslaitteella (PANK 4206) voidaan laboratoriossa simuloida päällysteeseen kohdistuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulokset esitetään väsymissuorana ja väsymisyhtälönä.

Väsymisyhtälö on muotoa

$$N = a \cdot (1/\epsilon)^b, \quad (13)$$

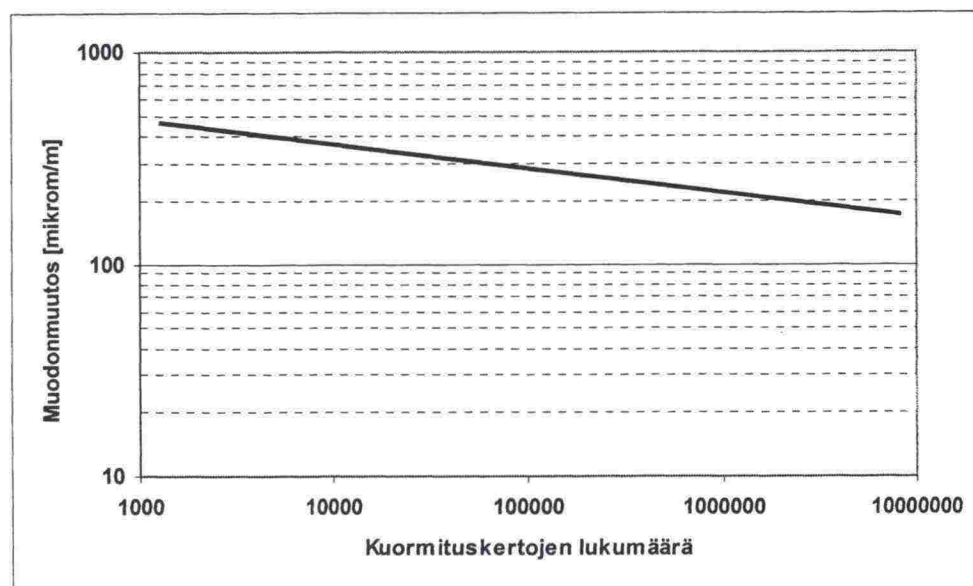
missä

N on kuormituskertaluku  
 $\epsilon$  suhteellinen muodonmuutos ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )  
 a,b materiaalivakioita

Väsymislaitteella mitattava kuormituskertaluku ei ole tierakenteen todellisuudessa kestävä kuormituskertaluku vaan materiaalikohtainen ominaisuus.

Taulukko 14. ABK25 B70/100 massan materiaalivakiot väsytykskoeksessa, voimaohjattu koe. (Apilo, 1996)

log a	b
26,1	8,6



Kuva 25. ABK32 B70/100 kerroksen väsymissuora.



Jäykkyysmoduuli

Toistuvat liikennekuormitukset aiheuttavat sekä kimmoisia että plastisia muodonmuutoksia. Tietyn kuormituskertamäärän jälkeen jännitysmuodonmuutossykli vakiintuu ja muodonmuutokset ovat lähes kimmoisia. Tätä tilaa kuvaa jäykkyysmoduuli. Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella, PANK 4204. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa.

*Taulukko 15. ABK32:n jäykkyysmoduulien arvot eri testauslämpötilassa.*

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C, MPa	+ 15 °C, MPa	+ 25 °C, MPa
B20/30	12500	8000	4000
B35/50	12500	6800	3500
B50770	11500	6300	3200
B70/100	10500	5700	2900

Poisson luku

Poisson luku asfalttibetonille vaihtelee yleensä välillä 0,3 – 0,4. Jos Poisson lukua ei ole erikseen määritetty, suositellaan käytettäväksi lukua 0,35.

Vedenkestävyys

Asfalttimassan vedenkestävyys on kiviaineksen ja sideaineen välisen tartunnan vedenkestävyys. Vedenkestävyys tutkitaan halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä PANK 4301. Kokeessa käytetään samaa kiviainesta ja bitumia kuin valmiissa päällysteessä. Tarttuvuuslukuvaatimus AA 11-massalle on 60 % ja suhteituksen mukaiselle massalle 80 %.

Pakkasenkestävyys

Alhaisissa lämpötiloissa päällysteeseen syntyy talvella poikkisuuntaisia halkeamia, kun päällyste kutistuu. Pakkasenkestävyyteen vaikuttaa eniten käytettävä sideainelaatu. Pehmeä bitumi kestää paremmin alhaisia lämpötiloja päällysteen halkeamatta kuin kova bitumi. Kumibitumin käyttö sideaineena parantaa päällysteen pakkasenkestävyyssominaisuuksia. Pakkasenkestävyyttä suunniteltaessa pitää huomioida deformaatio-kestävyys, joka on yleensä pakkasenkestävyyttä merkittävämpi.

Lämmönjohtavuus

Routanousulaskennassa tarvitaan lähtötietona materiaalin lämmönjohtavuusarvo. Asfalttibetonin lämmönjohtavuus on yleensä 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

**5.4.2 Vaahtobitumistabilointi VBST**

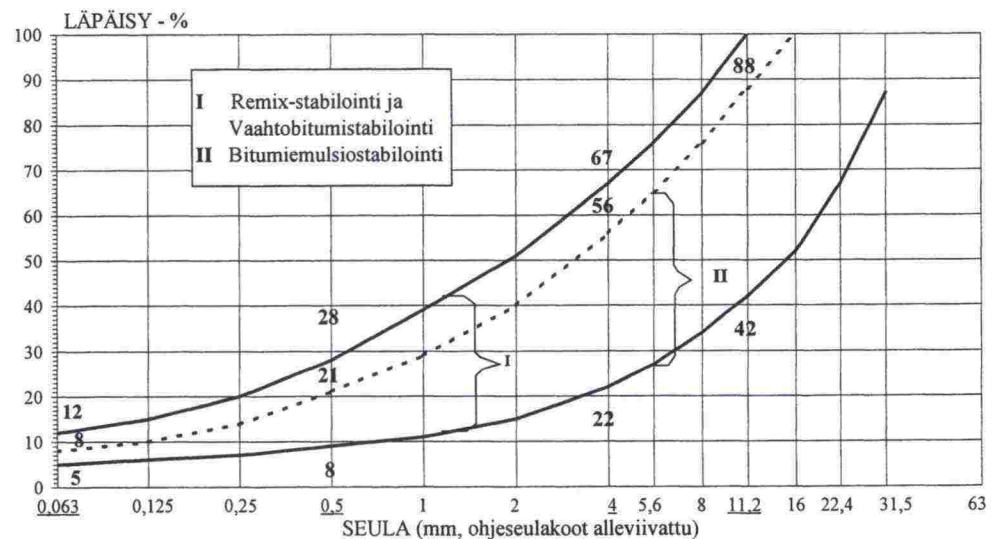
Vaahtobitumistabiloinnissa tien kantavan tai jakavan kerroksen jäykkyyttä lisätään sitomalla kylmä kiviaines vaahtotetulla bitumilla. Työmenetelmät ovat asemasekoitus tai paikallasekoitus.

Paikallasekoitusmenetelmässä (tiesekoitus) sideaine sekoitetaan stabiloitavaan kerrokseen suoraan rakennuskohteessa työhön tarkoitettulla jyrsinsekoittimella. Asemasekoitusmenetelmässä stabilointimassa valmistetaan erikseen työhön tarkoitettulla sekoitusasemalla ja massan levitystyö tehdään rakennuskohteessa.

Ennen paikallasekoitusta kiviaineksesta poistetaan tai murskataan yli 100 mm kivet. Sideaineena käytetään bitumia B70/100 ... B650/900, joka vaahdotetaan ennen sekoitusta. Bitumiin voidaan lisätä korkean lämpötilan kestävää tartuketta.

Yksittäiset yli 100 mm:n kivet on poistettava ennen stabilointia.

Sideaineena käytetään bitumia B70/100...B650/900 ja sideainepitoisuus on 3,2 – 4,2 massa-%.



Kuva 26. Bitumistabilointi massojen rakeisuuskäyrän ohjealueet. (Asfalttinormit 2000).

Stabiloitava kerrospaksuus on yleensä 100 - 200 mm.

#### 5.4.2.1 Deformoituminen ja väsyminen

Bitumistabilointi on asfalttibetoniin verrattuna hauras materiaali, jolla on alhaisempi sideainepitoisuus ja suurempi tyhjätila. Bitumistabilointi on myös vaikeammin tiivistettävää kuin asfalttibetoni.

Tällä hetkellä ei ole olemassa sopivaa menetelmää bitumistabiloinnin deformaatio- ja väsymisominaisuuksien määrittämiseksi. Asfalttimateriaalien tutkimiseen kehitetty asfaltin väsytyslaite ei sovellu asfalttia paljon hauraamman bitumistabiloinnin testaamiseen. Mitoituksessa tarkastellaan bitumistabiloinnin päälle tulevan kerroksen väsymisominaisuuksia.

#### Jäykkyysmoduuli



Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella yksi- tai kolmiakσιαalikokeella. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa. Pystysuuntaiset muodonmuutokset mitataan näytelieriön keskiosasta. Taulukon 16 arvot on määritetty yksiakσιαalikokeella.

*Taulukko 16. VBST jäykkyysmoduulien arvot eri testauslämpötilassa.*

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C	+ 15 °C	+ 25 °C
VBST B160/220	4000 - 5100	2100 - 2900	1000 - 1700

Taulukossa 16 esitetyt jäykkyysmoduulit edustavat jatkuvan rakeisuuskäyrän mukaisia arvoja. Paikallasekoitusmenetelmässä stabiloitavan kerroksen rakeisuus vaihtelee huomattavasti, mikä on otettava huomioon mitoitusparametreja valittaessa. Määritys on tehty kolmiakσιαalikokeena, missä sellipaine on nolla. VBST materiaalia ei ole testattu riittävästi tarkempien moduuliarvojen määrittämiseksi.

### 5.4.3 Bitumiemulsiostabilointi BEST

Bitumiemulsiostabiloinnissa tien kantavan tai jakavan kerroksen jäykkyyttä lisätään sitomalla kylmä kiviaines bitumiemulsiolla. Työmenetelmät ovat asemasekoitus- ja paikallasekoitus.

Ennen paikallasekoitusta kiviaineksesta poistetaan tai murskataan yli 100 mm kivet. Bitumiemulsio sisältää bitumia, vettä ja emulgaattoria. Sideaineena toimii vain emulsion bituminen osa. Sideaineena käytetään bitumia B70/100 ... B650/900, joka emulgoidaan ennen sekoitusta. Bitumiemulsio on hitaasti tai keskinopeasti murtuva emulsio. Sideaineen (bitumin) määrä on 3,2 – 4,2 massa-%.

#### Jäykkyysmoduuli

Jäykkyysmoduuli tarvitaan lähtötietona päällysrakenteen analyyttisessä mitoituksessa. Moduuli määritetään dynaamisella yksi- tai kolmiakσιαalikokeella. Testauksessa voidaan käyttää esim. MTS-laitteistoa. Pystysuuntaiset muodonmuutokset mitataan näytelieriön keskiosasta. Taulukon 17 arvot määritetty yksiakσιαalikokeella.

*Taulukko 17. BEST jäykkyysmoduulien arvot eri testauslämpötilassa.*

M <sub>rk</sub> (MPa)	+ 5 °C	+ 15 °C	+ 25 °C
BEST B160/220	3400 - 4400	1600 - 2400	800 - 1200

Taulukossa 17 esitetyt jäykkyysmoduulit edustavat jatkuvan rakeisuuskäyrän mukaisia arvoja. Paikallasekoitusmenetelmässä stabiloitavan kerroksen rakeisuus vaihtelee huomattavasti, mikä on otettava huomioon mitoitusparametreja valittaessa. Määritys on tehty kolmiakσιαalikokeena, missä sellipaine on nolla. BEST materiaalia ei ole testattu riittävästi tarkempien moduuliarvojen määrittämiseksi.



#### 5.4.4 Remixstabilointi REST

Remixstabilointi on bitumistabilointimenetelmä, jossa bitumiemulsio sekoitetaan hienontuneeseen kantavan kerroksen yläosaan, lisäkiviainekseen ja lämmitettyyn (pehmeä) asfalttibetonirouheeseen. Sekoitus tehdään asfaltinvalmistuksessa käytettävällä jatkuvatoimisella sekoittimella tiellä.

Remix-stabiloinnissa vanha päällyste lämmitetään säteilylämmittimillä. Menetelmässä lämmitetty päällyste ja kantavan kerroksen hienontunut yläosa jyrsitään, massaan lisätään uutta kiviainesta tarvittava määrä ja seos sekoitetaan bitumiemulsioon kanssa. Tämän jälkeen valmis massa levitetään ja tiivistetään.

Sideaineena käytettävä bitumiemulsio sisältää bitumia, vettä ja emulgaattoria. Sideaineena toimii vain emulsion bituminen osa. Sideaineena käytetään bitumia B70/100 ... B650/900, joka emulgoidaan ennen sekoitusta. Bitumiemulsio on hitaasti tai keskinopeasti murtuva emulsio. Lisättävä sideainemäärä määräytyy käytettävien materiaalien perusteella.

#### 5.5 Kirjallisuusviitteet lukuun 5

- /1/ Apilo, Laura. Kantavan kerroksen asfalttibetoni, referenssimateriaalin ominaisuudet. TPPT-projekti M11, loppuraportti. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 1996.
- /2/ Asfalttinormit 2000, Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. Helsinki 2000.
- /3/ Kurki, Timo. Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 13/1998. Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki 1998.
- /4/ Spoof, Harri. Asfaltin väsyminen. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO TR4/2 loppuraportti. VTT Tie-, geo- ja liikennetekniikan

## 6. KOMPOSIITTIMATERIAALIT

### 6.1 Yleistä

Bitumi-sementti-komposiitilla tarkoitetaan tien päällysrakenteen kantavaa, side- tai jakavaa kerrosta, jossa on käytetty sideaineena sekä bitumia että sementtiä. Tien pohja- ja päällysrakenteet (TPPT) tutkimusohjelmaan liittyvän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää komposiittimateriaalimallin rakenne, toimintaperiaatteet, mitoituksessa tarvittavat materiaaliparametrit ja niiden keskeiset ohjearvot.

Laboratoriotutkimukset toteutettiin v.1994-97 VTT:n Yhdyskuntatekniikan ja Rakennustekniikan tutkimusyksiköiden yhteistyönä. Aluksi tehtiin laboratoriossa esikokeita viidellä eri tavalla valmistetulla komposiittityypillä ja näistä valittiin kolme lupaavinta jatkotutkimuksiin. Jatkotutkimuksiin valittiin komposiittityypit:

- sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti
- asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti ja
- komposiittistabilointi.

Kullekin komposiittityypille kehitettiin sille soveltuva suhteitusmenetelmä ja selvitettiin massojen optimikoostumukset ja mitoituksessa tarvittavat keskeiset parametrit ja tarkistettiin laboratoriokeiden tulokset koetietutkimuksin. Lähtökohtana komposiittimassan suhteitukselle ovat rakenteen käyttöolosuhteet, joiden mukaan asetetaan massan suhteitusvaatimukset.

Kaikkia kolme jatkotutkimuksiin valittua komposiittityyppiä tutkittiin koetierakentamisen avulla v. 1996 ja 1999. TPPT-projektin komposiittitutkimuksista on valmistunut 7 raporttia [1] - [7].

Komposiittitutkimusten olennainen lopputulos oli, että ne tuottivat näiden kolmen erilaisen komposiittityypin analyttisen mitoituksen perustiedot (mm. väsyminen, jäykkyys sekä pakkasenkestävyys).

Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti on erityisen lupaava materiaali. Siinä yhdistyvät muihin tutkittuihin komposiitteihin verrattuna parempi väsytyksenkestävyys sekä pienillä että suuremmilla muodonmuutoksilla, suhteellisen suuri jäykkyys ja hyvä pakkasenkestävyys.

Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti toimi hyvin sekä laboratoriokeissa että koetiellä. Tämä oli asfaltinomaisin tutkituista komposiiteista.

Komposiittistabilointi oli laboratoriokeivaiheessa tutkitulla koostumuksella jäykkä, mutta suhteellisen hauras materiaali. Se oli betoninomaisin tutkituista komposiiteista. Oikealla sementtipitoisuuden valinnalla käyttökohteen mukaan voidaan kuitenkin välttää materiaalin liiallinen jäykkyys heikoilla alustoilla. Sen pakkasenkestävyys riittävällä sementtipitoisuudella oli hyvä betonirakenteiden pakkasenkestävyyskriteerien mukaan. Komposiittistabiloinnin etu bitumistabilointiin verrattuna on nopeampi alkulujuuden kehitys.



Mitoitusparametreina käytettävien ominaisuuksien arvot (jäykkyyssmoduuli ja väsyminen) on esitetty seuraavissa luvuissa ja muut ominaisuudet liitteessä 2.

## 6.2 Tutkimusmenetelmien valinta

Tutkimusmenetelmän soveltuvuus komposiiteille, jotka ovat asfaltti- ja betonirakenteiden välimuotoja, riippuu siitä, onko rakenne enemmän asfaltti- vai betonirakenteen tyyppinen. Tämän ratkaisee tapauskohtaisesti rakennekerroksen koostumus ja se, miten komposiitin osa-aineet (kiviaines, bitumi ja sementti) ovat sijoittuneet massassa toisiinsa nähden.

Esikoemenetelmiksi valittiin palkin taivutusvetolujuuskoe ja lieriön halkaisu- vetolujuuskoe. Menetelmät valittiin sillä perusteella, että suhteellisen halvalla, nopeasti ja muilla materiaaleilla tehtyihin tutkimuksiin vertailukelpoisella tavalla saatiin karkea kuva kunkin komposiittityypin osa-aineiden yhdistämistavan käyttökelpoisuudesta ja materiaalien alustavista lujuusominaisuuksista.

Molemmat menetelmät mittaavat koekappaleen lujuusominaisuuksia ja muodonmuutuskäyttäytymistä. Ne on kehitetty betoni- ja asfalttinäytteiden tutkimuksia varten, eivätkä ne siksi yhtä hyvin sovellu kaikille muun tyyppisille materiaaleille. Bitumi-sementti-komposiitin käyttöominaisuuksien kannalta ei tavoite ole mahdollisimman suuri murtolujuus. Ratkaisevia ovat ne ominaisuudet, joita rakenteella on sen jälkeen, kun sen betonikomponenttiin on syntynyt halkeamia sekä kuinka kauan kestää, ennen kuin halkeama syntyy. Materiaalin murtumisen sitkeyttä kuvaa vetolujuus, joka rakenteella on halkaisuvetolujuus- tai taivutusvetolujuuskokeessa murtumisen jälkeen. Ehjän rakenteen kestoikää mitattiin väsytyksokeella ja rakenteen jäykkyyttä jäykkyyssmoduulikokeella.

Komposiittitutkimusten tutkimusmenetelmät on esitetty lyhyesti liitteessä 1.

## 6.3 Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti

### 6.3.1 Käyttökohteet

Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti on avoimen asfaltin ja sementtilaastin komposiitti, joka soveltuu toiminnallisten ominaisuuksiensa perusteella parhaiten korkealuokkaisten teiden kantavaksi kerrokseksi tai sidekerrokseksi.

### 6.3.2 Koostumus

Tätä komposiittityyppiä varten tulee suhteittaa erikseen avoin asfalttimassa ja sementtipohjainen imeytyslaasti. Sementtilaasti imeytetään valmiiseen avoimeen asfalttikerrokseen.

a) Avoin asfaltti



Avoimen asfaltin tyhjätilan tulee olla 20-25 % ja sen koostumus suunnitellaan Asfalttinormien 2000 mukaan. Maksimiraekooksi soveltuu tutkimuksen mukaan 20-25 mm. Jos valitaan maksimiraekoko 20 mm, massasta saadaan helpommin työstettävää kuin karkeammalla raekoolla. Sideaineeksi soveltuu luokkaa pehmeämpi bitumi kuin kantavan kerroksen asfalttibetoniin. Laboratoriokokeissa ja koetiellä bitumi B120 toimi hyvin 3,0-4,5 % pitoisuuksilla.

#### b) Imeytyslaasti

Imeytyslaasti sekoitetaan sementistä ja hienosta luonnon kiviaineksesta, jonka maksimiraekoko on enintään 1 mm, notkistavista ja huokostavista lisäaineista sekä vedestä. Sementtilaastilla pyritään täyttämään avoimen asfaltin tyhjätila mahdollisimman tarkoin. Sementtilaasti lujittaa ja jäykistää avoimen asfalttirungon.

Ilman lisäys laastiin parantaa komposiitin pakkasenkestävyyttä sekä vähentää massan erottumisherkkyttä. Laastin tulisi täyttää seuraavat tavoitteet:

- Laastin ilmapitoisuus 6-7 %.
- Laastin puristuslujuus 15-20 MPa 28 d iässä.
- Tuoreen laastin olomuoto lähes nestemäistä.
- Massa ei saa erottua käsittelyn aikana.

Luonnonhiekkafillerin tulisi olla vähintään yhtä hienoa kuin kehitysvaiheen kokeissa käytetty (0,125 mm:n läpäisy vähintään 30 %). Jos filleri on karkeampaa, tulee massasta helposti erottuvaa. Tätä erottumisherkkyttä voidaan kompensoida ilma- ja sideainepitoisuutta kasvattamalla. Jos käytettävä filleri on hienompaa, voidaan massan sideainepitoisuutta pienentää ja siten alentaa myös materiaalikustannuksia.

Huokostavan lisäaineen vaikutus ei ole lineaarinen. Materiaalien yhteistoiminnan monitahoisuuden takia yleispäteviä lisäaineiden tarkkoja reseptiannostuksia ei voida esittää. Kunkin massan tarkat lisäaineannostukset tulee hakea kokeellisesti esikokeilla siten, että edellä esitettyt laastin tavoitekriteerit täyttyvät. Notkistavina lisäaineina ei pidä käyttää ilmanpoistajaa sisältäviä lisäaineita. Näitä voi olla erityisesti lignosulfonaattipohjaisissa notkistimissa. Taulukossa 18 esitetään esikokeiden lähtökohdaksi sopiva laastireseptiesimerkki.

*Taulukko 18. Imeytyslaastin koostumusesimerkki.*

Osa-aine	Määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
Sementti	310
Lentotuhka	310
Hieno hiekka	990
Vesi	315
Notkistin	7,8
Huokostin	0,25

Laastin imeytyksen aikana asfalttikerrosta tärytetään, jolloin laastin imeytyminen tehostuu ja voidaan käyttää hieman jäykempää laastia. Jäykemmän laastin erottumisherkkyys on vähäisempi ja ilman pysyvyys laastissa on varmempaa.

#### c) Komposiitti

Komposiitista tutkitaan tyhjätila ja jäykkyysmoduuli sekä tarvittaessa halkaisuvelolujuus, pakkasenkestävyys ja suolankestävyys.

### 6.3.3 Ominaisuudet

Sementtilaastilla imeytetyn avoimen asfaltin sitkeysominaisuudet ja muodonmuutoskäyttäytyminen olivat enemmän asfaltinomaiset kuin muilla tutkituilla komposiiteilla. Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti toimi laboratorikokeissa hyvin. Se vastasi halkaisuvelolujuudeltaan vertailumateriaalina olevaa kantavan kerroksen asfalttibetonia, mutta oli huomattavasti jäykempää. Lämpötila vaikutti komposiitin jäykkyyteen, ei kuitenkaan yhtä paljon kuin vertailumateriaalin jäykkyyteen. Pakkasenkestävyydeltään komposiittityyppi oli tyydyttävä. Asfaltin väsytyslaite soveltui komposiitin tutkimiseen vakiovoimaohjauksella, mutta ei muodonmuutosohjauksella. Materiaalin jäykkyyden vuoksi muodonmuutokset kokeessa olivat suhteellisen pieniä.

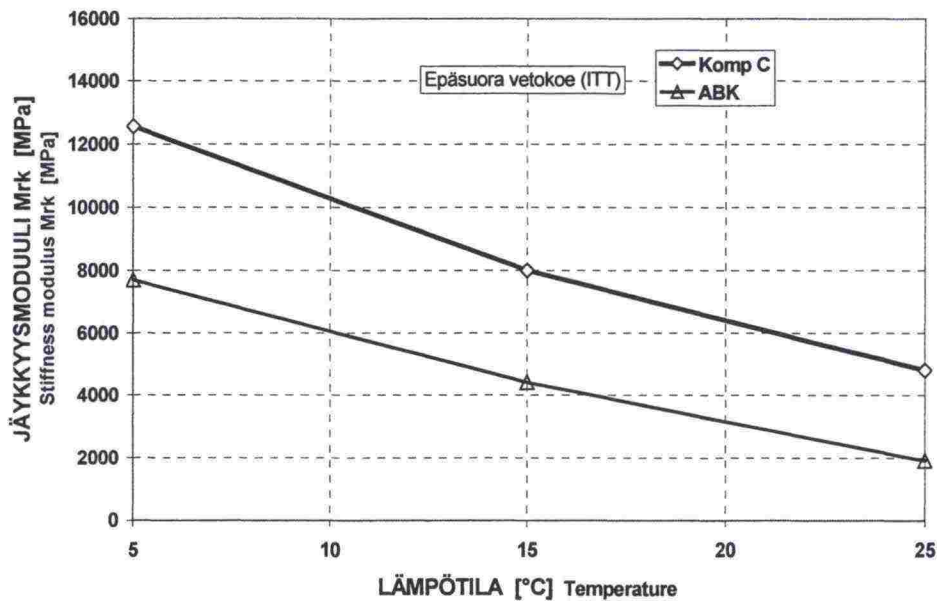
Sementtilaastilla imeytettyä avointa asfalttia tutkittiin myös päällysrakennekoetillä (vt 3 Jutikkala). Koetien avoimen asfaltin teossa ei ollut ongelmia. Sementtilaastin imeytyksessä osoittautuivat ratkaisevan tärkeiksi levitystyövaiheiden tahdistaminen siten, että työ sujui keskeytyksettä ja imeytyslaastin notkeuden hallinta. Kun työ sujui keskeytyksettä, päästiin niin tyhjätilan kuin lujuudenkin suhteen työmaalla yhtä hyvään lopputulokseen kuin laboratoriossa. Komposiitin tyhjätila on hyvä mittari imeytystyön onnistumiselle. Tehtyjen vastemittausten mukaan koetien komposiittikoealueen kuormituskestävyys on noin 300-kertainen ABK-vertailurakenteen vastaavaan arvoon verrattuna. Tutkimustulosten yhteenvetotaulukot on esitetty liitteessä 2.

### 6.3.4 Mitoitus

Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti voidaan mitoittaa ehjän rakenteen mitoitusperiaatteiden mukaan väsymissuoran ja jäykkyysmoduulin avulla. Tämän komposiitin jäykkyysmoduuli eri lämpötiloissa on esitetty taulukossa 19 ja kuvassa 27.

*Taulukko 19. Sementtilaastilla imeytetyn avoimen asfaltin jäykkyysmoduulikokeen tulokset (epäsuora vetokoe).*

Materiaali	Bitumi		Sem. pit. %		Jäykkyysmoduulit eri lämpötiloissa, MPa		
	laji	%			+ 5 °C	+ 15 °C	+ 25 °C
(C) Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti	B120	~3,5	~3,5	M <sub>r</sub>	10700	7600	4900
				M <sub>rk</sub>	12550	8000	4800



Kuva 27. Sementillä imeytetyn avoimen asfaltin sekä vertailumateriaalin (ABK25) jäykkyysmoduuli  $M_{rk}$  (epäsuora vetokoe).

Väsymisyhtälö on kaavan 14 mukainen. Väsymissuoran materiaalivakioiden lukuarvot on esitetty taulukossa 20.

$$N = a \times \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (14)$$

missä  $N$  = kuormituskertaluku  
 $\varepsilon$  = suhteellinen muodonmuutos ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )  
 $a$  ja  $b$  = materiaalivakioita

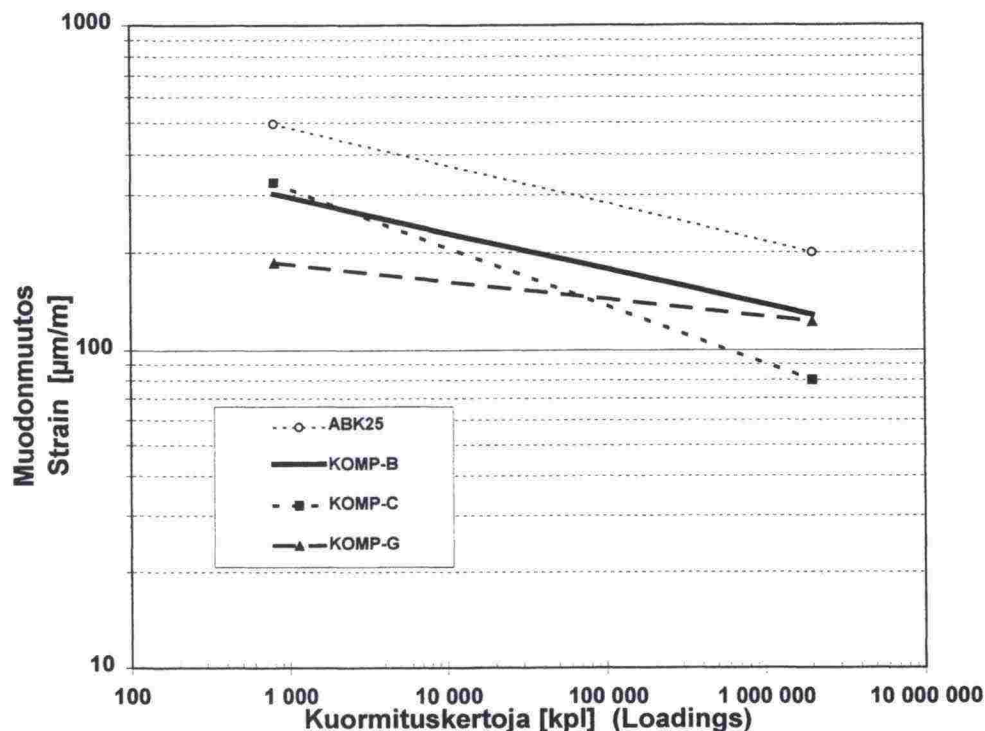
Taulukko 20. Sementtillaastilla imeytetyn avoimen asfaltin materiaalivakiot väsytykskoeksessa (voimaohjattu koe).

log a	b	r
16,86	5,55	0,96

Materiaalin Poisson lukuna voidaan käyttää arvoa 0,3 ja lämmönjohtavuutena 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

Eri komposiittityyppien ja kantavan kerroksen asfalttibetonin väsymissuorat on esitetty kuvassa 28.





Kuva 28. Kolmen komposiittityypin ja kantavan kerroksen asfalttibetonin väsymissuorat voimaaajauksella (+15 °C)

- ABK = Kantavan kerroksen asfalttibetoni  
 Komp-B= Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti  
 Komp-C= Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti  
 Komp-G= Komposiittistabilointi (bit. 3 %, sem. 3 %).

## 6.4 Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti

### 6.4.1 Käyttökohteet ja koostumus

Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitin käyttökohteet ovat korkealuokkaisten teiden sidekerroksessa tai kantavassa kerroksessa.

Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitin suhteituksen lähtökohtana ovat asfalttirouheen saatavuus ja ominaisuudet sekä paikalliset kiviainekset. SMA-rouhe toimii hyvin komposiitissa, jonka ominaisuuksille on eduksi SMA:n korkeahko sidepitoisuus ja kuidut. Rouheen kiviaineksen rakeisuus hienonee huomattavasti jyrynnän aikana ja siksi rouheeseen tulee aina lisätä karkeaa kiviainesta. Rakeisuutta suhteitettaessa rouhe on yksi lajitteista. Tehdyssä tutkimuksessa rouheen osuus runkoaineksesta oli 63 %. Kiviainelajitteet valitaan rouheen rakeisuuden mukaan siten, että massan rakeisuus on jatkuva, maksimiraekoko noin 20 mm ja 0,063 mm seulan läpäisyarvo noin 4-8 %. Luonnonhiekkalajitteet paremman tiivistyvyytensä vuoksi soveltuvat lisäkiviainekseksi paremmin kuin murske.

Komposiitin optimivesipitoisuus määritetään Proctor-kokeella. Sementtipitoisuus vaikuttaa optimivesipitoisuuteen, mikä tulee ottaa Proctor-kokeissa huomioon. Rakeisuuskäyrä optimoidaan tarvittaessa ICT-kokein. Sementtipitoisuus valittiin TPPT-tutkimuksessa siten, että komposiitin puristuslujuus 7d iässä on noin 4-5 MPa. Jatkossa on suositeltavaa tutkia komposiitin jäykkyyshmoduuli vaihtoehtoisilla massan koostumuksilla rakennuskustannuksiltaan merkittävien kohteiden ennakkokokeiden yhteydessä, koska kahden eri sideaineen (myös käytettävistä kiviaineksista riippuvan) yhteisvaikutuksen avulla voidaan huomattavasti vaikuttaa valmiin rakenteen jäykkyyshtasoon ja säätää se tavoitetasolle. Komposiitin tyhjätila sekä pakkasen- ja suolankestävyys tutkitaan tarvittaessa suhteituksen yhteydessä. Rouhekomposiittimassa valmistetaan kylmäsekoitustekniikalla.

#### 6.4.2 Ominaisuudet

Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitissa rouherakeet on sidottu toisiinsa sementtilaastilla. Yhdistetty rouherakeiden ja sementtilaastin kiviaineksen seos muodostaa jatkuvan rakeisuuskäyrän.

Komposiitti on helposti tiivistettävää. Väsytyshkokeessa materiaali kesti muihin tutkittuihin komposiitteihin verrattuna hyvin sekä pieniä että komposiittimateriaalin yleisen käyttäytymisen huomioonottaen myös suhteellisen suuria muodonmuutoksia. Hyvästä väsymiskestävyydestä huolimatta materiaali oli muihin komposiitteihin verrattuna myös jäykkää ja lujaa. Sillä oli myös hyvä pakkasenkestävyys. Tämän komposiitin perinteinen vaihtoehto tierakenteessa on kantavan tai sidekerroksen asfalttibetoni tai maabetoni. Komposiitin etuna esim. kantavan kerroksen asfalttibetoniin verrattuna on suurempi jäykkyys ja lämpötilan vähäisempi vaikutus materiaalin ominaisuuksiin. Asfalttirouhekomposiitin erityiseturina on, että se on uusiotuotemateriaali ja että sen valmistaminen on yksinkertaista. Tutkimustulosten yhteenvetotaulukot on esitetty liitteessä 2.

#### 6.4.3 Mitoitus

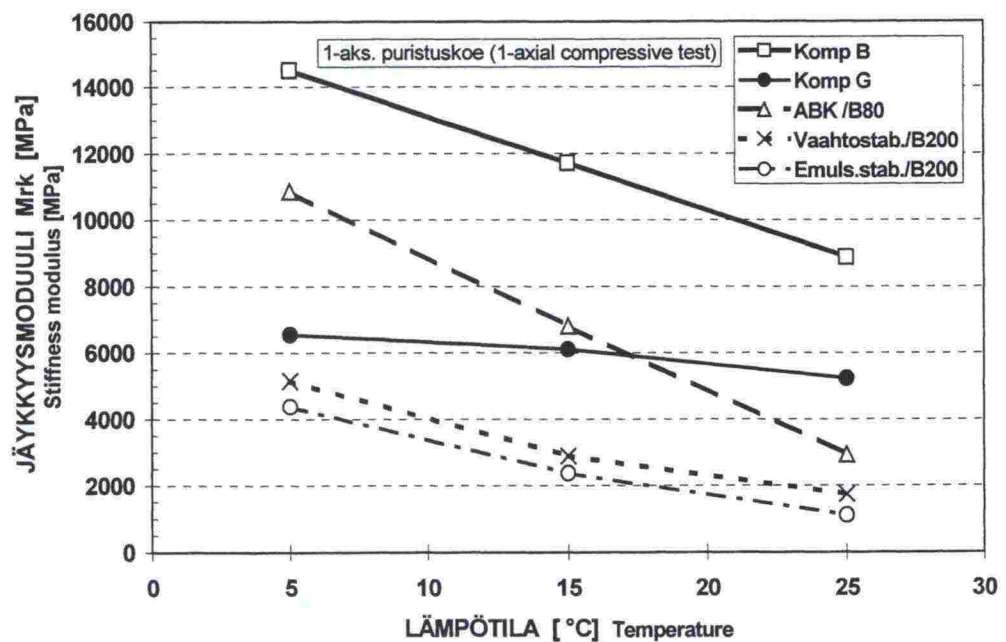
Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti voidaan mitoittaa ehjän rakenteen mitoitusperiaatteiden mukaan tutkimuksen tuloksissa esitetyn väsymissuoran ja jäykkyyshmoduulin avulla. Tämän komposiitin jäykkyys eri lämpötiloissa on esitetty taulukossa 21 ja kuvassa 29.

Väsymissuoran (kaava 14) materiaalivakioiden lukuarvot on esitetty taulukossa 22. Eri komposiittityyppien ja kantavan kerroksen asfalttibetonin väsymissuorat on esitetty kuvassa 28.

Materiaalin Poisson lukuna voidaan käyttää arvoa 0,3 ja lämmönjohtavuutena 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

Taulukko 21. Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitin jäykkyyssmoduuli, 1-aksiaalinen puristuskoe.

	Bit.pit. %	Sem. pit. %		Jäykkyyssmoduuli[MPa]		
				+ 5 °C	+ 15 °C	+ 25 °C
Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti	~4,4	~4,9	M <sub>r</sub>	13900	11400	8300
			M <sub>rk</sub>	14500	11700	8900



Kuva 29. Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitin (B), komposiittistabiloinnin (G) sekä emulsio- ja vaahtobitumistabiloinnin jäykkyyssmoduuli M<sub>rk</sub> (1-aksiaalinen puristuskoe)

Taulukko 22. Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitin materiaalivakiot (kaava 14) väsytykskokeessa (voimaohjattu koe).

log a	b	r
25,55	9,13	0,97

## 6.5 Komposiittistabilointi

### 6.5.1 Käyttökohteet ja koostumus

Komposiittistabilointi on eräs kantavan kerroksen vaihtoehto sekä vilkkaasti liikennöidyillä teillä että vähäliikenteisten teiden rakenteen parantamiskoh-teissa.

Komposiittistabilointimassan rakeisuuskäyrä on jatkuva. Jos käytetään paikalta, vanhan tien rakenteesta saatavaa materiaalia, rakeisuutta korjataan tarvittaessa lisäkiviaineksen avulla. Runsas hienoainesmäärä lisää semen-



tin ja bitumin tarvetta, joten kannattaa pyrkiä alhaiseen hienoainesmäärään. Sopivat bitumi- ja sementtipitoisuudet valittiin TPPT-tutkimuksessa halkaisuvetolujuuden perusteella. Jatkossa on suositeltavaa tutkia komposiitin jäykkyyssmoduuli vaihtoehtoisilla massan koostumuksilla rakennuskustannuksiltaan merkittävien kohteiden ennakkokokeiden yhteydessä, koska kahden eri sideaineen (myös käytettävistä kiviaineksista riippuvan) yhteisvaikutuksen avulla voidaan huomattavasti vaikuttaa valmiin rakenteen jäykkyytasoon ja säätää se tavoitetasolle. Komposiitin tyhjätila sekä pakkasen- ja suolankestävyys tutkitaan tarvittaessa suhteituksen yhteydessä.

Massa sekoitetaan kylmänä asemalla tai paikallarakennustekniikalla. Sementin käytöllä nopeutetaan bitumistabiloinnin alkulujittumista. Bitumi sekoitetaan massaan emulgoituna tai vaahdotettuna. Jos alusta routii epätasaisesti, sementin käyttömäärän tulee olla riittävän alhainen, jotta rakenteesta ei tehdä liian haurasta.

### 6.5.2 Ominaisuudet

Laboratoriotutkimuksissa komposiittistabilointimassa valmistettiin sekoittamalla kiviaines, sementti ja bitumiemulsio keskenään. Pakkasenkestävyys-tavoitteen saavuttamiseksi valittiin komposiitin sementtipitoisuus suhteellisen korkeaksi (3 %). Tämä massa oli vaikeasti tiivistettävää. Komposiitin lujuusominaisuudet riippuvat merkittävästi sen tiivyydestä.

Komposiittistabiloinnin etuna bitumistabilointiin verrattuna on nopea alkulujuuden kehitys ja lämpötilan vähäisempi vaikutus materiaalin jäykkyyteen. Komposiittistabiloinnin pakkasenkestävyysominaisuudet olivat hyvät. Väsytysokeessa materiaali toimi enemmän betonimaisesti kuin muut komposiitit. Materiaalin kuormituskestävyys oli suhteellisen vähän riippuvainen muodonmuutoksen suuruudesta, kunhan muodonmuutos ei ylittänyt tiettyä rajaa.

Koetierakenteessa Nakkilassa komposiittistabiloinnilla pyrittiin nopeuttamaan stabiloidun massan alkulujittumista. Tutkimuksen mukaan jo vähäiselläkin (1 %) sementtipitoisuudella komposiittistabiloinnin alkulujittuminen nopeutui huomattavasti vaahtobitumistabilointiin verrattuna. Tutkimustulosten yhteenvetotaulukot on esitetty liitteessä 2.

### 6.5.3 Mitoitus

Komposiittistabiloinnin keskeiset mitoitusominaisuudet voidaan valita käyttökohteen mukaan sementti- ja bitumipitoisuuksia muuttamalla. Epätasaisesti painuvilla (deformoituvilla) pohjilla tulee sementtipitoisuuden olla riittävän alhainen, jotta komposiittikerros säilyy joustavana.

Myös tämä komposiitti voidaan mitoittaa ehjän rakenteen mitoitusperiaatteiden mukaan väsymissuoran ja jäykkyyssmoduulin avulla. Esitetyt parametrit eivät kuitenkaan sovellu mitoitusperusteiksi epätasaisesti painuvilla alusrakenteilla.

Komposiittistabiloinnin jäykkyys eri lämpötiloissa on esitetty taulukossa 23 ja kuvassa 29.

Väsymissuoran (kaava 14) materiaalivakioiden lukuarvot on esitetty taulukossa 24. Eri komposiittityyppien ja kantavan kerroksen asfalttibetonin väsymissuorat on esitetty kuvassa 28.

Taulukko 23. Komposiittistabiloinnin jäykkyysmoduuli, 1-akselialinen puristuskoe.

	Bitumi- pit. %	Sem. pit. %		Jäykkyysmoduulit eri lämpötiloissa, MPa		
				+ 5 °C	+ 15 °C	+ 25 °C
Komposiittistabilointi (Emulsio K-0)	3,0 <sup>*)</sup>	3,0	M <sub>r</sub>	7000	6300	5500
			M <sub>rk</sub>	6500	6100	5200
Komposiittistabilointi (Bit. B200 vaahd. ÖS-rouhe 50 %)	2,9 <sup>**)</sup>	1,0	M <sub>r</sub>		2000	

<sup>\*)</sup> jäävä bitumipitoisuus, <sup>\*\*)</sup> lisäbitumipitoisuus

Taulukko 24. Komposiittistabiloinnin materiaalivakiot (kaava 14) väsytyksko-  
keessa (voimaohjattukoe, bitumipitoisuus 3 %, sementtipitoisuus 3 %).

log a	b	r
44,87	18,48	0,92

Materiaalin Poisson lukuna voidaan käyttää arvoa 0,3 ja lämmönjohtavuute-  
na 1-2 W/m<sup>2</sup>K.

## 6.6 Kirjallisuusviitteet lukuun 6

- /1/ Laukkanen, K., Leivo, M., Seppänen, P., Bitumi-sementti-massa-  
komposiittien soveltuvuus tien päällysrakenteeseen. Espoo 1994,  
TPPT-projekti M41, väliraportti nro M1, VTT Yhdyskuntatekniikka,  
tutkimusraportti 253.
- /2/ Laukkanen, K., Leivo, M., Bitumi-sementti-massakomposiittien so-  
veltuvuus tien päällysrakenteeseen. Espoo 1995, TPPT-projekti  
M41, Väliraportti nro M5, VTT Yhdyskuntatekniikka.
- /3/ Laukkanen, K., Leivo, M., Bitumi-sementti-massakomposiittien so-  
veltuvuus tien päällysrakenteeseen 3. Espoo 1996, TPPT-projekti  
M41, Väliraportti nro M6, VTT Yhdyskuntatekniikka.
- /4/ Laukkanen, K., Leivo, M., Bitumi-sementti-massakomposiittien so-  
veltuvuus tien päällysrakenteeseen 4. Espoo 1997, TPPT-projekti  
M41, Väliraportti nro M9, VTT Yhdyskuntatekniikka.

- /5/ Laukkanen, K., Leivo, M., Bitumi-sementti-komposiittien ominaisuudet ja tutkimusmenetelmät. Helsinki 1999, Tielaitoksen selvityksiä 42/1999, TPPT-loppuraportti, Projekti M41.
- /6/ Laukkanen, K., Pihlajamäki, J., Pienimäki, M., Sikiö, J., Nakkilan stabilointikoetie. Espoo 1999, TPPT-projekti Ra3 Koerakenteiden rakentaminen, seuranta ja tulokset, Kohderaportti, VTT Yhdyskuntatekniikka.
- /7/ Laukkanen, K., Pihlajamäki, J., Seinäjoen asfalttirouhekomposiittikoetie. Espoo 1999, TPPT-projekti Ra3 Koerakenteiden rakentaminen, seuranta ja tulokset, Kohderaportti, VTT Yhdyskuntatekniikka.

## 6.7 LIITTEET lukuun 6

- LIITE 1 Komposiittien tutkimusmenetelmät
- LIITE 2 Tulosten yhteenvetotaulukot



LIITE 1.1(5)

## KOMPOSIITTIIEN TUTKIMUSMENETELMÄT

### TAIVUTUSVETOLUJUUSKOE

Palkit (450 \* 100 \* 70 mm<sup>3</sup>) taivutettiin murtoon +20 °C:n lämpötilassa MTS-puristimella. Palkkien jänneväli taivutuksessa oli 300 mm. Palkkeihin kohdistettiin kaksi viivakuormaa, joiden väli oli 100 mm. Palkkeja kuormitettiin 5 mm:n taipumaan asti. Kuormitusnopeus oli 0,5 mm/min. Taipuma mitattiin kahdella liikeanturilla, jotka molemmat sijaitsivat palkin keskellä. Taipuma laskettiin anturien mittaustulosten keskiarvona.

Voiman ja taipumien arvot rekisteröitiin kokeen aikana 0,5 s välein. Taivutusvetojännitys laskettiin standardin SFS 5444 mukaisella kaavalla. Tulosten perusteella piirrettiin taivutusvetojännitys-taipuma kuvaajat. Kimmomoduulit laskettiin kuormituksen lineaariselta osalta kuormaväliä 10 - 40 % murtokuormasta kaavalla 1.

$$E = \frac{P \cdot a}{24 f \cdot I} \cdot (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

jossa	E = kimmomoduuli	[MPa]
	P = voima	[N]
	a = kuorman etäisyys tukipisteestä	[mm]
	L = tukipisteiden välimatka	[mm]
	f = taipuma	[mm]
	I = jäykkyys	[mm <sup>4</sup> ].

### HALKAISUVETOLUJUUSKOE

Halkaisuvetolujuus on lieriömäisen koekappaleen sivusuuntaisessa puristuskokeessa määritetystä murtokuormituksesta laskettu epäsuora vetolujuus. Halkaisuvetolujuuskokeet suoritettiin menetelmän PANK-4202 mukaisesti +10 °C:ssa. Kokeessa puristettiin koekappalelieriön vaippaa kahdella lieriön keskiakselin suuntaisella teräspalkilla vakionopeudella 50 mm/min. Ennen koestusta näytteet temperoitiin tutkimuslämpötilaan. Kokeen aikana mitattiin leukojen siirtymä sekä näytteeseen kohdistuva voima siirtymän funktiona. Halkaisuvetolujuus laskettiin kaavalla (2)

$$\sigma_{\max} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (2)$$

jossa	$\sigma_{\max}$ =	halkaisuvetolujuus	[MPa]
	$P_{\max}$ =	maksimikuorma	[N]
	d =	koekappaleen halkaisija	[mm]
	h =	koekappaleen korkeus	[mm].

## LIITE 1.2(5)

**JÄYKKYYSMODUULI (EPÄSUORA VETOKOE)**

Epäsuoraan vetokokeeseen perustuva kuormitusmenettely (ITT-koe = Indirect Tensile Test) komposiitin jäykkyysmoduulin (Resilient Modulus) määrittämiseksi dynaamisella kuormituslaitteistolla oli SHRP-menetelmän [4] ns. pohjoismainen sovellutus. Näytteet olivat komposiittilaatasta porattu- ja lieriöitä ( $D = 100$  mm,  $h = 50$  mm). Näytteiden ylä- ja alapohjat olivat sahattuja pintoja. Näytteet olivat osittain samoja, jotka myöhemmin tutkittiin halkaisuvetolujuuskokeessa. Koelämpötilat olivat +5, +15 ja +25°C.

Jäykkyysmoduulikokeessa kuormitetaan sylinterin muotoista näytettä kohtisuoraan sen keskiakselia vastaan ja mitataan palautuvat poikkisuuntaiset muodonmuutokset. Moduuli lasketaan tunnetun kuormituspulssin aiheuttaman vaakavetojännityksen ja palautuvien vaakamuodonmuutosten avulla. Palautusvaiheen muodonmuutosten oletetaan olevan elastisia. Jäykkyysmoduulikokeen tuloksena ilmoitetaan sekä jäykkyysmoduuli  $M_r$  että pohjoismaisen SHRP-LTPP version mukaan korjattu jäykkyysmoduuli  $M_{rk}$ . Moduulit lasketaan kaavoilla (3a) ja (3b)

$$M_r = \frac{P(\nu + 0,27)}{t \times \Delta h} \quad (3a)$$

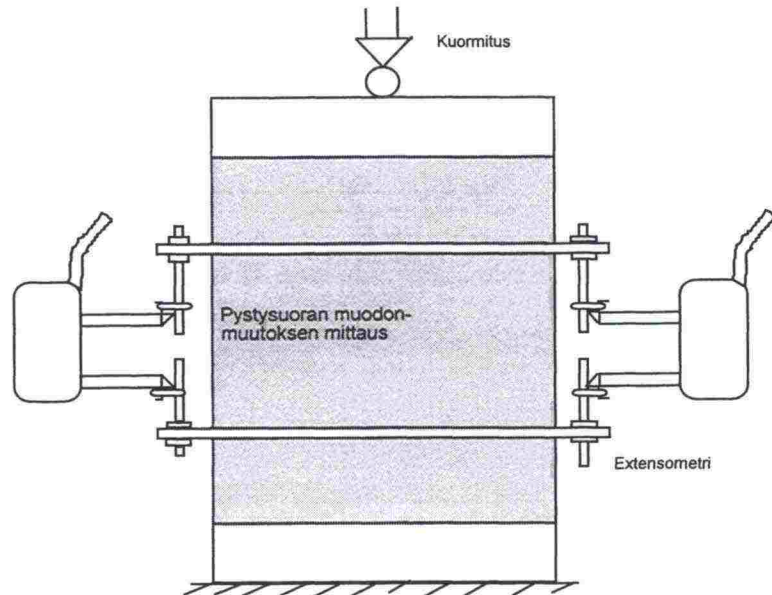
$$M_{rk} = \frac{\pi d k (\nu + 0,27)}{2} \quad (3b)$$

missä	$M_r$ = jäykkyysmoduuli	[MPa]
	$M_{rk}$ = korjattu jäykkyysmoduuli	[MPa]
	$P$ = kuormitusmuutos	[N]
	$\Delta h$ = palautuva vaakamuodonmuutos	[mm]
	$k$ = havaintopisteisiin sovitetun suoran kulmakerroin	[MPa/mm]
	$d$ = näytteen halkaisija	[mm]
	$t$ = näytteen paksuus	[mm]
	$\nu$ = Poisson luku.	

**JÄYKKYYSMODUULI (1-AKSIAALINEN PURISTUSKOE)**

Osalle komposiiteista jäykkyysmoduuli määritettiin 1-aksisena puristuskokeena MTS:n kuormituslaitteistolla, kuva 30. Näytteet olivat Kango-poravaralla tiivistettyjä lieriöitä ( $D = 150$  mm,  $h = 300$  mm). Näytteiden ylä- ja alapohjat oli tasattu rikkilaastilla. Näytteet olivat osittain samoja, jotka myöhemmin tutkittiin staattisessa moduulikokeessa. Koelämpötilat olivat +5, +15 ja +25°C.

LIITE 1.3(5)



Kuva 30. Jäykkyysmoduulin 1-akσιαalisen määrittämisskokeen periaatekuva.

Näytettä kuormitettiin 1-akσιαalisesti pysty akselin suunnassa (sivupaine nolla) sinimuotoisella puristusvoimapulssilla taajuudella 0,33 Hz (menetelmä Nordic SHRP PO7) ja näytteen pystysuuntaiset muodonmuutokset mitattiin näytteen keskiosasta (100 mm matkalta). Moduuli laskettiin mitatun puristuskuormapulssin ja mitattujen palautuvien aksiaalisten muodonmuutosten avulla. Jäykkyysmoduulikokeen tuloksena ilmoitetaan sekä jäykkyysmoduuli  $M_r$  että ruotsalaista FAS 454-menetelmää mukaillen korjattu jäykkyysmoduuli  $M_{rk}$ . Moduulit lasketaan kaavoilla (4a) ja (4b).

$$M_r = (\Delta P / A_0) / (\Delta v / H_0) \quad (4a)$$

$$M_{rk} = K * H_0 \quad (4b)$$

missä $M_r$ = jäykkyysmoduuli	[MPa]
$M_{rk}$ = korjattu jäykkyysmoduuli	[MPa]
$\Delta P$ = aksiaalinen kuormitusmuutos	[N]
$\Delta v$ = aksiaalinen muodonmuutos, näytteen päiden väliltä/mittausväliltä	[mm]
$A_0$ = näytteen pinta-ala	[mm <sup>2</sup> ]
$H_0$ = näytteen korkeus/mittausväli	[mm]
$K = \Delta v - \Delta \sigma_1$ havaintopisteisiin sovitettun suoran kulmakerroin	[MPa/mm]
$\Delta \epsilon_1 = \Delta v / H_0$ kokoonpuristuman muutos	[-]
$\Delta \sigma_1 = \Delta P / A_0$ pystykuormituksen muutos	[MPa]

$M_{rk}$  määritetään sovittamalla suora  $\Delta v - \Delta \sigma_1$  -koordinaatistoon piirrettyihin havaintopisteisiin.  $M_{rk}$  on kulmakertoimen ja havaintovälin tulo. Määrittäminen voidaan tehdä myös  $\Delta \epsilon_1 - \Delta \sigma_1$  -koordinaatistossa. Tällöin korjattu moduuli  $M_{rk}$  on suoraan kulmakerroin  $K$ .



## LIITE 1.4(5)

**STAATTINEN MODUULIKOE**

Jäykkyyshmoduulikokeessa olleet koekappaleet puristettiin murtoon aksiaali-suunnassa siirtymänopeudella 3 mm/min. Nopeus vastaa noin 1 %/min laskettuna koekappaleen (rikittömästä) korkeudesta (noin 300 mm). Koestuslämpötila oli +20 °C. Tulosten perusteella laskettiin kaavalla 5 staattinen moduuli jännitysvälille 300...1000 MPa.

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} \quad (5)$$

jossa  $\Delta\sigma_1$  = pystyjännityksen muutos [MPa]  
 $\Delta\varepsilon_1$  = aksiaalisen kokoonpuristuman muutos [-]

**VÄSYTYSKOE**

Asfaltin väsytyslaitteessa (AVL) palkin muotoiset koekappaleet on asetettu joustaville kumialustoille. Väsytykskokeen aikana laite painaa valitulla voimalla toistuvasti koekappalepalkin keskiosaa. Tällöin sekä palkki että kumialusta taipuvat. Kumialusta palauttaa palkin ja kuormituslaatan lähtöasentoon kuormitus sykäysten välissä olevan tauon aikana. Koekappaleen kuormitusjakso muodostuu 0,05 s kuormitusajasta ja 0,95 s tauosta.

Laitetta voidaan ohjata joko pitämällä kokeen aikana määrätyn suuruista toistuvaa voimasykäystä vakiona tai määrätyn suuruista toistuvaa muodonmuutosta vakiona. Yksittäisen koekappaleen kuormituskertojen lukumäärä määräytyy siitä hetkestä, jolloin molemmat koekappaleeseen liimatut, murtumaa havainnoivat venymäliuskat menevät poikki.

Lähtömuodonmuutos riippuu kokeen ohjaustavasta. Kun ohjaustapana on vakio muodonmuutos, on lähtömuodonmuutos yhtä suuri kuin ohjausmuodonmuutos. Kun ohjaustapana on vakio voima, käytetään lähtömuodonmuutokselle sitä arvoa, jonka kyseessä oleva ohjausvoima aiheuttaa kuormitus sykäykselle numero 200. Tämän kuormitus sykäyksen venymäarvo on valittu lähtövenymäarvoksi sillä perusteella, että laitteiston aiheuttamat kuormitukset ovat tähän mennessä ehtineet asettua oikealla tasolle.

Tulokset esitetään matemaattisesti väsymisfunktion avulla (kaava 6) sekä graafisesti.

$$N = a * \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (6)$$

missä N = maksimi kuormituskertaluku  
 $\varepsilon$  = suhteellinen muodonmuutos,  $\mu\text{m}/\text{m}$   
a ja b = regressiosuoran vakioita

## LIITE 1.5(5)

Tulokset sijoitetaan suorakulmaiseen logaritmiseen koordinaatistoon siten, että x-akselilla on kuormitusyökkäysten lukumäärä (N) ja y-akselilla koekappaleen (alapinnan) suhteellinen muodonmuutos ( $\epsilon$ ). Koekappaleen muodonmuutos ilmaistaan mittayksikössä mikrometri/metri [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] eli mikrost-rain [ $\mu\text{S}$ ].

Jokainen koestettu koekappale vastaa kuvassa yhtä pistettä. Koesarjan kaikki pisteet asettuvat edellä mainitussa koordinaatistossa lähes samalle suoralle. Pistejoukon regressiosuoraa kutsutaan väsymissuoraksi.

Koekappaleen kestoikä riippuu kokeen ohjaustavasta ja siksi tutkitaan yhdelle massalle yleensä kaksi väsymissuoraa (vakiovoima ja vakiomuodonmuutos).

Koekappalepalkit (koko  $405 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ ) sahattiin komposiittilaatoista. Väsytyksokeet tehtiin  $+15^\circ\text{C}$  lämpötilassa.

## PAKKASENKESTÄVYYSKOE

Pakkasenkestävyyskoetta varten sahattiin komposiittilaatoista kuutioita (koko  $70 \times 70 \times 70 \text{ mm}^3$ ). Osa näytteistä rasiitettiin (vanhennettiin) syklisellä jäädytys-sulatusrasituksella ja osa näytteistä oli pakkasenkestävyyden vertailunäytteitä.

Komposiittien pakkasenkestävyys tutkittiin standardin SFS 5447 mukaan. Koe on yleisessä käytössä betonin kaltaisten materiaalien pakkasenkestävyyden arvioinnissa. Vastaavat standardimenetelmät ovat olemassa lähes kaikissa maissa, joissa betoni altistuu pakkasrasitukselle.

Kokeessa koekappaleisiin kohdistettiin toistuvia jäädytys- ja sulatusjaksoja. Jäädytys-sulatuslaitteistolla saatiin aikaan peräkkäisiä jäädytyksiä ilmassa lämpötilassa  $-20^\circ\text{C}$  ja sulatuksia vedessä lämpötilassa  $+20^\circ\text{C}$ . Vuorokaudessa tehtiin kolme jäädytys-sulatussykliä. Koekappaleet punnittiin 25 syklin välein. Yleisesti käytetään betonin pakkasenkestävyyden arvosteluun sen painon muutosta sekä lujuuden muutosta 100 jäädytys-sulatusjakson jälkeen. Lujuuden muutos määritetään vertaamalla jäädytys-sulatusrasituksessa olleiden koekappaleiden ja yhtä pitkän ajan vesisäilytyksessä olleiden, saman koostumuksen omaavien vertailukoekappaleiden (rinnakkaisnäytteiden) lujuuksia keskenään.



## LIITE 2.1(3)

## TULOSTEN YHTEENVETOTAULUKOT

**Komposiittien ja vertailumateriaalien taivutusvetolujuus, vastaava taipuma sekä taivutuksesta määritetty kimmomoduuli**

(T= +20 °C)	Koestus-ikä d	Taivutusvetolujuus MPa	Taipuma mm	Kimmo- moduuli MPa
(C) Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti				
Laastin kehityskoe -97	70	0,42	0,66	390
Jatkotutk. -95	21	0,51	0,63	760
Esikoe -94	28	0,90	0,32	4400
(B) Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti				
Jatkotutk. -97	50	1,30	0,10	16000
Esikoe -94	28	1,11	0,12	10300
(G) Komposiittistabilointi				
Jatkotutk. -96	28	0,47	0,04	10200
Esikoe -95	28	0,52	0,08	
Kantavan kerroksen asfalttibetoni ABK 25 (bitumi B80, ref.)				
Ref.tutk. -96		0,27	n. 6	20
Kantavan kerroksen asfalttibetoni ABK 20 (bitumi EKB)				
Esikoe -94		1,10	5,3	240
Maabetoni				
Esikoe -95	42	2,12	0,03	19100

## Komposiittien ja vertailumateriaalien halkaisuvetolujuus

	Koestus-ikä d	Tyhjätala [%]	Halkaisuvetolujuus, +10°C, [MPa]		
			min	ka	max
(C) Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti					
Laastin kehityskoe -97	56		1,24	1,50	1,63
Koetien näytteet -96	56	11	0,91	1,03	1,24
Suhteituskokeet -96	28	12	0,98	1,03	1,07
Jatkotutk. -95	28		1,36	1,58	1,96
Suhteituskokeet -95	28		1,41	1,50	1,56
			1,17	1,36	1,57
Esikoe -94	28		1,08	1,30	1,44
(B) Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti					
Jatkotutk. -97	28		0,9	1,06	1,15
Esikoe -94	28		0,67	1,06	1,34
(G) Komposiittistabilointi					
Jatkotutk. -96 T= +23 °C T= +10 °C T= +10 °C	1		0,05	0,06	0,07
	8		0,28	0,30	0,33
	28		0,34	0,36	0,38
Esikoe -95	28		0,43	0,45	0,48
Kantavan kerroksen asfalttibetoni ABK 25 (bitumi B80, ref.)					
Ref.massatutkimus -96		4,1	1,20	1,58	1,96
Kantavan kerroksen asfalttibetoni ABK 20 (bitumi EKB)					
Esikoe -94			2,10	2,25	2,47



LIITE 2.2(3)

**Komposiittien ja vertailumateriaalien korjatut jäykkyyshmoduulit**

Massatyyppi ( <i>T</i> = +15 °C)	Koe- tyyppi	Korjattu jäykkyys- moduuli, M <sub>rk</sub> [MPa]	Bitumi- laji	Bit. pit. [%]	Sem. pit. [%]	Ikä [d]
Komposiitti C*	ITT	7990	B120	~3,5	~3,7	~ 28
ABK 25		4420	B80	4,5	-	
Bit.emuls.stab.		500 - 950	B200	3,5-5,5	-	~ 14
Komposiitti B*	1-aks. purist.	11715		~4,4	4,9	~ 28
Komposiitti G*		6100	B200	3	3	~ 28
ABK 25		6800	B80	4,5	-	
Bit.emuls.stab.		1550	B200	3,6	-	9
		2380	B200	3,6	-	87
Vaahtobitumistab.		1980	B200	3,5	-	10
		2890	B200	3,5	-	83

\*) Komposiittilaji: B = Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti  
C = Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti  
G = Komposiittistabilointi

**Kahden komposiittityypin pystyjännitys ja muodonmuutos murtotilassa sekä staattinen moduuli**

( $T = +22\text{ °C}$ )	Yks.	min	ka	max
(B) Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti				
Pystyjännitys	MPa	3,6	3,8	4,0
Muodonmuutos	%	0,27	0,31	0,35
Staattinen moduuli	MPa	3500	3650	3940
(G) Komposiittistabilointi				
Pystyjännitys	MPa	2,1	2,3	2,5
Muodonmuutos	%	0,45	0,48	0,48
Staattinen moduuli	MPa	970	1470	1770

## LIITE 2.3(3)

**Komposiittien ja vertailumateriaalin pakkasenkestävyys**

Massanmuutos jäädytys-sulatuskokeessa (m-%)					Puristuslujuus (T=20°C)		
	Sykliä lukumäärä				Ennen	Jälk.	Muutos
	25	50	75	100	MPa	MPa	%
(C) Sementtilaastilla imeytetty avoin asfaltti							
Jatkotutk.-95	+0,1	+0,2	+0,2	+0,5	4,5	3,3	-27
Koetiesuht.koe							
B120	+1	+1	+1	+1	3,4	1,9	-44
B80	+2	+2	+2	+2	4,2	2,8	-33
Laastin kehitys	+0	+0	+1	+0	5,4	4,1	-24
(B) Asfalttirouheen ja sementtilaastin komposiitti							
Jatkotutk.-97	+1	+1	+1	+1	4,7	3,9	-17
(G) Komposiittistabilointi							
Esikoe-95							
sem 3%, bit 1%	+1,9	+1,6	+1,2	+2,0	12	7,8	-35
sem 3%, bit 3%	+1,5	+1,0	+1,0	+0,9	4,6	3,1	-33
sem 1%, bit 3%	+1,3	-3,8	-11	-17	1,4	...	...
Jatkotutk.-96	+1	+1	+1	+1	1,5	1,5	0
Kantavan kerroksen asfalttibetoni ABK 25 (bitumi B80, ref. mat.)							
Tutkimus -96 )	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	1,7*)	1,3*)	-24

\*) ABK:n halkaisuvetolujuus, T=10 °C

Yleisesti käytetty kriteeri betonimateriaalien pakkasenkestävyydelle on, että lujuudesta tulisi olla jäljellä yli 2/3 osaa sadan jäädytys-sulatusjakson jälkeen.

## 7. SEMENTILLÄ SIDOTTU MOREENIMURSKE

### 7.1 Yleistä

Hydraulisilla sideaineilla tapahtuvassa stabiloinnissa kiviaines lujitetaan sideaineen avulla rasituksia vastaan tilavuudeltaan lähes muuttumattomaksi ja kestävyydeltään pitkäaikaiseksi massaksi. Sideaineena käytetään erilaisia sementtejä. Sidotusta massasta käytetään yleisesti nimitystä maabetoni. Työmenetelminä ovat asema- ja paikallasekoitus.

Lujittuneen massan jäykkyys pienentää rakenteen taipumaa, alustaan kohdistuvia jännityksiä sekä yläpuolella olevien bitumilla sidottujen kerrosten alapinnan muodonmuutoksia. Toisin sanoen stabiloitu kerros toimii kuten jäykkä laatta. Maabetonirakenne tasoittaa alusrakenteesta ja vuodenajoista johtuvia kantavuuseroja.

Tienrakennuksessa on pyrkimyksenä kehittämällä jäykkää (tai ainakin routimatonta) rakennevaihtoehtoa hyödyntää myös sekundäärisiä, tien rakennekerroksiin sellaisenaan kelpaamattomia materiaaleja. Potentiaalisin sekundäärinen aines on moreeni, jota esiintyy hyödynnettävinä esiintyminä suurimmassa osassa Suomea. Stabiloinnin hyöty saavutettaisiin sekä materiaalin suuren jäykkyyden että massan saatavuuden kautta.

TPPT-tutkimusohjelmassa selvitettiin moreenimurskeen hienoaineksen laadun ja määrän vaikutusta massan stabilointiominaisuuksiin. Stabiloitua materiaalia tutkittiin sekä VTT:llä /1/ että Oulun yliopistossa /2/. TPPT:ssä tutkittiin myös moreenin / moreenimurskeen rakeistamista. Tämä tutkimus tehtiin Tielaitoksen kehittämiskeskuksessa Oulussa ja Tampereen teknillisessä korkeakoulussa /3/.

### 7.2 Materiaaliominaisuudet

#### 7.2.1 Mitoitusparametrit

Stabiloidun maa-aineksen, myös moreenin, mitoitusparametrit ovat jäykkyysmoduuli ja väsymis-/deformaatiokäyttäytymistä kuvaavat parametrit. Lisäksi tarkistettavia, materiaalin kelpoisuutta osoittavia ominaisuuksia ovat jäädytys-sulatus -syklien kesto ja muut olosuhteista johtuviin rasituksiin liittyvät tekijät (esim. suola, lämpölaajeneminen).

Epäsuorana materiaalin kelpoisuutta kuvaavana ominaisuutena on tutkittu puristuslujuutta.

Seuraavassa on lyhyesti esitetty stabiloidulle moreenille TPPT -projektissa tehtyjen kokeiden tulokset /1/, /2/.



### 7.2.2 Puristuslujuus

VTT:n tekemistä kokeista /1/, joissa tutkittiin erilaisen rakeisuuden sekä hienoaines- ja kiillemäärän omaavia stabiloituja moreeneja, on saatu seuraavia tuloksia:

- Moreenimurskeen hienoainespitoisuuden ollessa 20 % puristuslujuus kasvoi lähes lineaarisesti sideainepitoisuuden funktiona. Hienoainespitoisuudella 40 % lujuuden kasvu ei ollut yhtä suoraviivaista.
- Maabetonilta vaadittava 7 vrk:n puristuslujuus 5 MPa saavutettiin eri moreenimateriaaleilla 2 – 8 % :n sideainemäärillä.
- Hienoainesmäärän kasvu kaksinkertaiseksi alensi puristuslujuutta 35 – 40 %.
- Kiillelisäys (20 %) alensi puristuslujuutta keskimäärin 50 %.
- Hienoaineksen ominaispinta-alalla ei ollut vaikutusta lujuuskehitykseen.
- Humuspitoisuudella ei ollut vaikutusta lujuuskehitykseen.
- Tiiveysasteen aleneminen 5 %-yksikköä alensi lujuuksia keskimäärin 20 %.
- Massan valmistusvaiheen vesipitoisuuden pieneneminen 2 %-yksikköä optimivesipitoisuudesta alensi lujuutta keskimäärin 20 %

### 7.2.3 Hydrauliset ominaisuudet

- Stabiloidun materiaalin kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet olivat  $5 \times 10^{-7} \dots 4 \times 10^{-8}$  m/s. Yhdessä tapauksessa vedenläpäisevyys oli  $5 \times 10^{-10} \dots 2 \times 10^{-10}$  m/s.
- Lujittumisen vaikutus vedenläpäisevyyteen oli vähäinen.
- Osittain kyllästyneessä tilassa vedenläpäisevyys pienenee voimakkaasti tilavuusvesipitoisuuden funktiona.

### 7.2.4 Lämmönjohtavuus

- Materiaalien sulan tilan lämmönjohtavuudet 7 vrk:n ikäisinä olivat 1,43...1,68 W/m<sup>2</sup>K ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet vastaavan ikäisinä olivat suurempia ( 1,72...2,34 W/m<sup>2</sup>K) määritettynä epästatio-nääriseissä tilassa yksisondimenetelmällä.
- Sulan tilan lämmönjohtavuus kasvoi lujittumisen aikana. Tämä aiheutuu sitoutumisen seurauksena pienenevästä vesipitoisuudesta. Jäätyneen tilan lämmönjohtavuuksissa ei vastaavaa ilmiötä ollut havaittavissa.
- Materiaalien lämmönjohtavuudet pystytään arvioimaan routamitoitusta varten riittävällä tarkkuudella kokemusperäisellä Kerstenin kaavalla.

### 7.2.5 Routivuus

- Sitomattomana routiva moreenimateriaali voidaan saada routimattomaksi jo pienellä sideaineen lisäyksellä /2/.

### 7.2.6 Jäykkyys- ja muodonmuutosmääritykset

VTT:n tekemistä kokeista /1/, joissa tutkittiin erilaisen rakeisuuden sekä hienoaines- ja kiillemäärän omaavia stabiloituja moreeneja, on saatu seuraavia tuloksia.

#### 7.2.6.1 Dynaaminen jäykkyysmoduuli

- Materiaalien dynaamiset jäykkyysmoduulit 7 vrk:n ikäisinä olivat välillä 900 ... 12900 MPa. Kokeet tehtiin dynaamisella kolmiakselilaitteistolla käyttäen sinimuotoista kuormituspulssia. Vastaavasti 19 vrk:n ikäisistä näytteistä määritetyt arvot olivat välillä 3300 ... 13300 MPa
- Jäädytys-sulatussyklit (12 kpl) alensivat dynaamisia jäykkyysmoduuleja keskimäärin 10 % . Poikkeuksena oli materiaali, jonka huokoskokojakautuma poikkesi selvästi muista materiaaleista. Sen dynaaminen jäykkyysmoduuli aleni jäädytys-sulatussykliin seurauksena 80 %.
- Lujuuden vaikutus jäykkyysmoduularvoihin oli lineaarinen sekä valmistuskosteilla että kyllästetyillä näytteillä. Kokeet on tehty dynaamisella kuormituslaitteella SHRP P07 protokollan mukaisesti käyttäen yksiaksiaalista kuormitusmenettelyä ilman sellipaineita.
- Ehjän näytteen jäykkyysmoduuli oli noin 1000-kertainen saman materiaalin puristuslujuuteen nähden.
- Rikotun (murtoon puristettu näyte) näytteen moduuli oli noin 200-kertainen puristuslujuuteen nähden.
- Dynaaminen jäykkyysmoduuli oli noin kuusinkertainen staattiseen jäykkyysmoduuliin verrattuna.
- Jäädytys-sulatussykliin vaikutus moduularvoja heikentävästi näkyi niissä massoissa, joiden tiiveysaste oli alhainen ja joissa hienoainesta oli runsaasti tai hienoainesominaisuudet olivat huonot.

#### 7.2.6.2 Deformaatiokoe

- Stabiloitujen moreeninäytteiden jäykkyys kasvoi kuormituskertojen funktiona ainakin n.  $10^5$  kuormituskertaan asti. Kokeet on tehty dynaamisella kuormituslaitteella voimaohjattuina kuormitusyyskeinä.
- Jäykkyysmoduularvot olivat kokeen alussa 1150 ... 6800 MPa ja kokeen lopussa 3370 ... 7330 MPa.
- Näytteiden plastinen (pysyvä) muodonmuutos kasvoi kuormituskertojen mukaisesti.

#### 7.2.6.3 Poisson luku

Hydraulisesti sementillä stabiloitujen massojen Poisson luku vastaa betonin Poisson luvun arvoja. Ehjän massan Poisson luvun arvoksi voidaan ottaa  $\nu = 0.1 \dots 0.15$ . Kun massan sidokset purkautuvat, Poisson luku kasvaa lähemmäksi sitomattomien karkearakeisten materiaalien vastaavaa arvoa,  $\nu = 0.2 \dots 0.35$ .



### 7.3 Pitkäaikaiskestävyyden toteaminen

- Pelkästään puristuslujuuden perusteella stabilointimassan pitkäaikaiskestävyyttä ei voida arvioida.
- Jäädytys-sulatuskoesyklien massan rakennetta heikentävä vaikutus ei tule ilmi kokeen jälkeen tehtävissä puristuslujuuksien määrittämissä
- Jäädytys-sulatuskokeen stabilointia heikentävä vaikutus käy hyvin ilmi koekappaleen moduuliarvomuutoksina
- Betonin testaukseen kehitetty suolankestokoe erottelee stabilointimassat säänkesto-ominaisuuksiltaan toisistaan, vaikka koe maabetonin lujuus huomioiden on erittäin "raju".

Suomessa ei stabiloidun massan pitkäaikaiskestävyyden arvioimiseen ole asetettu muita vaatimuksia kuin puristuslujuusvaatimus. Massan puristuslujuuden 7 vuorokauden iässä tulee olla  $\geq 5$  MPa. Tällöin massa katsotaan pakkasenkestävyydeltään riittäväksi. Mitään suoria toiminnallisia kokeita ei vaadita. Esimerkiksi Saksassa on stabiloidulle tierakennusmateriaaleille esitetty selvä pakkasenkestävyysvaatimus ja sen määrittämiseen käytettävä koemenetelmä (CEN –standardiehdotus /5/). Oulun yliopistossa on käytetty vanhempaan ohjeeseen perustuvaa menettelyä stabiloitujen materiaalien pakkasenkestävyyden toteamiseen /6/.

### 7.4 Mitoitusparametrien käyttäytymisen syy-seuraussuhteet

Yleisohjeena voidaan todeta, että käytettävien stabiloitujen massojen ominaisuudet on aina tapauskohtaisesti selvitettävä. Selvitettävät ominaisuudet ovat ainakin jäykkyyshmoduuli ja pakkasenkestävyys. Stabiloidun massan (maabetonin) halkeilu näkyy kulutuskerroksessa heijastushalkeamina. Kuitistumishalkeiluun vaikuttavat lujuuden ja työtekniikan lisäksi myös massan lämpökäyttäytyminen (lämpölaajenemiskerroin).

Seuraavat yleistyksiset helpottavat stabiloitujen massojen mitoitusparametrien valintaa ja pitkäaikaiskestävyyden arviointia.

- Hienoaainesmäärän nousu 20 %:sta 40 %:iin laskee lujuutta noin 40 % ja jäykkyyttä yli 50 %.
- Kiilteen määrän kasvu (-> 20 %) laskee lujuutta ja jäykkyyttä noin 50 %.
- Sideaineen (sementin) määrä vaikuttaa suoraan lujuuteen ja jäykkyyteen.
- Minimisideainemäärä on n. 2,5 %
- Jäädytys-sulatus –syklit vaurioittavat materiaalia, jossa
  - on kiillettä > 15 %
  - hienoaineksen ominaispinta-ala > 6 m<sup>2</sup>/g
  - lujuus < 5 MPa
  - sementtiä < 2 %
- Massan sekoituskosteuden tulee olla riittävä, mutta ei liian suuri.



Näiden yleistyksien lisäksi rakenteen suunnittelussa tulee huolehtia siitä, että sen kuivatus on kunnossa. Stabiloidun maakerroksen, erityisesti stabiloidun moreenin, päälle (eikä myöskään alle) ei saa päästää vettä. Moreenipohjainen, paljon hienoainesta sisältävä massa pidättää kaiken siihen virranneen veden, muuttuu kyllästyneeksi ja hajoaa jäätymis-sulamissykliä vaikutuksesta. Hajoamista tehostavat vielä liikenteen aiheuttamat kuormitussyklit. Erityisen stabiloinnin pitkäaikaiskestävyys on ongelmallinen silloin, kun materiaalin hienoainesominaisuudet ovat huonot.

## 7.5 Vertailutietoa tavanomaisten rakennekerrosmateriaalien sementtistabiloinnista

Tielaitoksen Sementtistabilointiohjeen (1992) mukaan maabetonin runkoaineeksi kelpaavat lähes kaikki rakeiset materiaalit moreenista kalliomurskeeseen. Kiviaineksen rakeisuuskäyrän optimointi kuitenkin kannattaa yleensä tehdä sideainemäärän minimoimiseksi.

Kokeessa käytetyt kiviainekset olivat rakeisuudeltaan 20 % hienoainesta sisältävän materiaalin osalta stabilointiohjeiden ohjealueen A yläosassa ja vastaavasti 40 % hienoainesta sisältävän kiviaineksen rakeisuuskäyrä oli hienoainesmäärältään selvästi B-alueen ulkopuolella. Ohjealueilla olevat kiviainekset katsotaan soveltuvan parhaiten stabilointimateriaaleiksi.

Ohjeessa jaetaan stabiloidut materiaalit kolmeen luokkaan, joista kaksi rakennekerrokseen liittyvää ovat: laihat maabetonit ja maabetonit. Nämä jaetaan edelleen rakennekerroksen (suodatin/ pengertäyte, jakava/ kantava) ja sideaineen sekoitustavan (paikalla-, asemasekotteinen) mukaan luokkiin. Taulukkoon 1 on poimittu ohjeesta muutamia asioita.

*Taulukko 1. Sementtistabiloitujen materiaalien tavoitteellisia ominaisuuksia. Sementtistabilointiohje 1992.*

Ominaisuus	Laiha maabetoni Paikallasekoitus Suodatin/pengertäyte	Maabetoni Paikallasekoitus Jakava kerros	Maabetoni Paikallasekoitus Kantava kerros	Maabetoni Asemasekoitus Kantava kerros
Puristuslujuus (MPa)	2-4	3-4	5-6	6-8
E-moduuli (MPa) <sup>1)</sup>	800 (- 2500)	2000 (- 3000)	3000 (- 5000)	4000 (- 8000)
Sementtimäärä (kg/m <sup>3</sup> )	< 60	60 - 180	90 - 150	90 - 150
Sementtimäärä (%) <sup>2)</sup>	< 2.8	2.8 - 8.9	4.3 - 7.3	4.3 - 7.3
Kerrospaksuus (m)	0.2 - 1.0	0.14 - 0.3	0.14 - 0.3	0.14 - 0.3

<sup>1)</sup> Suluissa ensimmäisen vuoden moduuli. Mitoituksessa käytetään pienempää arvoa.

<sup>2)</sup> laskettu olettaen kiviaineksen tiheydeksi 2.2 t/m<sup>3</sup>.

Maabetonin lujuus-, jäykkyys- ja pysyvyysominaisuudet vaihtelevat runkoaineen, sideainemäärän ja sijoituspaikan vedensaannin mukaan.

Ohjeessa on myös esitetty kuinka sementin määrä kasvaa 5 MPa:n tavoitepuristuslujuudella sora-/kalliomurskeen 3.5-4.5 %:sta hienon hiekan ja savi-sen silttimoreenin 7-12 %:iin.

Sideainepitoisuuden määrä oli riippuvainen kokeiden perusteella enemmän materiaalin hienoainesominaisuuksista kuin itse hienoainesmäärästä, jonka mukaan stabilointiohjeet määrittelevät alustavan sideainetarpeen. Saatu sideainetarve oli alhaisempi kuin nomogrammin saatu alustava sideainetarve. Ero oli suurimmillaan yli 6 %-yksikköä.

## 7.6 Kirjallisuusviitteet lukuun 7

- /1/ Alkio, R., Laaksonen, R. Sementtistabiloidut materiaalit. Tielaitoksen selvityksiä 29/1998.
- /2/ Ahonen, M., Huttunen, E. ja Kujala, K. Hydraulisesti sidottujen materiaalien routakestävyys. Tielaitoksen selvityksiä XX/1997.
- /3/ Moreenin jalostaminen pellettoimalla. Tielaitoksen selvityksiä XX/1998.
- /4/ CEN/TC 227/WG 4 N 187 E:1996 German proposal for a test method on freeze-thaw resistance of hydraulically bound bases
- /5/ Kirsi Ylipiessa. Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osat 1-3. Tielaitoksen selvitykset numerot 23-25/1998.
- /6/ Sementtistabilointiohje. Valvonta ja laadunvalvonta. Tielaitos, Tiehallitus. Helsinki 1992.
- /7/ TP HGT-StB 86, Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragsschichten (HGT). Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstrassen. 1986. 23 s.

## 7.7 LIITTEET lukuun 7

LIITE 1. Koemenetelmät

LIITE 1.1(2)

## KOEMENETELMÄT

### Puristuslujuus

VTT:n tekemissä kokeissa stabiloitujen moreeninäytteiden puristuslujuus määritettiin kahdella tavalla. Ensimmäinen menettely noudatti Tielaitoksen sementtistabilointiohjeen /6/ menettelytapaa, eli näyte puristettiin murtoon voimaohjattuna. Voimaohjatussa kokeessa aksiaalinen voima nousee lineaarisesti ajan funktiona hauraaseen murtoon asti.

Toisessa menetelmässä näyte kuormitettiin murtoon siirtymäohjattuna. Siirtymänopeus oli 1 % näytteen korkeudesta minuutissa. Siirtymäohjatussa kokeessa kuormituslevyjen siirtymänopeus eli näytteen kokoonpuristuminen on vakio ja näytteen muodonmuutos on lineaarinen ajan suhteen. Siirtymäohjatussa kokeessa näytteen muodonmuutos mitattiin kuormituslevyjen välisestä liikkeestä.

Tehdyissä vertailukokeissa molemmat em. menetelmät tuottivat hyvin samanlaiset puristuslujuuden arvot.

### Dynaaminen jäykkyysmoduuli

Sidotun materiaalin dynaaminen jäykkyysmoduuli määritetään VTT:llä yksi-aksisiaalisella kokeella. Menetelmässä aksiaalinen kuormitus on SHRP P07:n standardin mukainen. Koska koe tehdään yksiaksisiaalisena, niin näytettä ei vaakasuunnassa tueta sellipaineella. Poikkeustapauksissa huonosti koossa pysyvillä materiaaleilla on käytetty kolmiakselitekniikkaa.

Kullakin näytteellä jäykkyysmoduuli määritetään 3-5 eri kuorman tasolla. Kuorman maksimiarvona käytetään rakenteessa massaan kohdistuvaa pystyjännitystä (silloin kun se voidaan arvioida). Pystykuorman maksimi rajataan kuitenkin aina tasolle 400 - 500 kPa.

Näytteen muodonmuutokset mitataan näytteen keskiosasta. Mittausväli vaihtelee näytteen korkeuden mukaan: 100 mm korkealla näytteellä mitausväli on n. 60 mm ja 300 mm korkealla näytteellä vastaavasti n. 150 mm.

Yksiakselikokeessa dynaamisen jäykkyysmoduulin määrittämiseen ei tarvita vaakasuuntaisen muodonmuutoksen mittausta. Toisaalta Poisson luvun määrittämiseen tarvitaan vaakasuoran muodonmuutosvasteen mittausta. Poisson luvun määrittäminen ei ole tehty stabiloiduilla massoilla. Hydraulisilla sideaineilla sidotuilla materiaaleilla käytetään samoja Poisson luvun arvoja kuin betonille.



## LIITE 1.2(2)

**Pysyvä muodonmuutos**

Sidotun materiaalin pysyvän muodonmuutoksen määrittäminen VTT:llä tehdään yksiaksiaalisella kokeella. Stabiloiduilla moreeneilla aksiaalinen maksimikuorma oli 1 MPa, josta staattisen kuorman osuus oli 0.1 MPa. Kuormitus-syklien määrä vaihteli 650 000:sta 1 000 000 sykliin asti. Kuormituksen aiheuttama palautuva ja pysyvä muodonmuutos mitattiin näytteen keski-osasta.

**Jäädytys-sulatuskoe**

Jäädytys-sulatuskokeessa koekappaleet sijoitettiin koestusikäisinä mataliin muovilaatikoihin, joiden pohjalla oli kosteana pidettävä huopa. Koekappaleet imivät huovasta vettä kapillaarisesti. Ennen kokeen alkua koekappaleet olivat 4 tuntia huoneenlämpötilassa laatikoissaan.

Jäädytysvaiheessa laatikot asetettiin pakkahuoneeseen, missä lämpötilaa laskettiin 0 °C:sta -15 °C:een 2,5±0,5 tunnin aikana. Koekappaleet olivat sitten -17 °C ± 0,5 °C lämpötilassa vähintään 8 tuntia. Sulatusvaiheessa laatikot tuotiin huoneenlämpötilaan 7 tunniksi, jossa ne saivat imeä vettä kapillaarisesti.

Jokaisen kierron välillä näytteet käännettiin ympäri. Jäädytys-sulatuskokeessa syklejä oli 12 kappaletta. Sykliä jälkeen koekappaleet punnittiin ja ulkonäköä tarkasteltiin visuaalisesti. Lopuksi koekappaleista määritettiin yksiaksiaalinen puristuslujuus. Jäädytys-sulatuskoe noudatteli pääosin saksalaista ohjetta "Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundenen Tragschichten, TB HGT-StB 86" /7/.

**Suolankestokoe**

Jäädytys-sulatuskokeessa koekappaleet olivat vuoroin kylmähauteessa ja vuoroin sulatushauteessa. Kylmähaute oli kylläinen NaCl -vesiliuos, jonka lämpötila oli -15 °C. Sulatushaute oli vesijohtovettä, jonka lämpötila oli 20 ± 2 °C. Kokeessa noudatettiin soveltuvin osin standardia SFS 5449 "Betonin. Säilyvyys. Pakkas-suolakestävyys".

Jäädytys-sulatuskierrossa kappaleet olivat noin kahdeksan tuntia kylmähauteessa ja noin 16 tuntia sulatushauteessa. Kierroja kokeeseen kuuluu 25 kappaletta. Mahdollisen rytmimuutoksen aikana koekappaleet pidettiin vesihauteessa. Standardin mukaan koekappaleiden tilavuuden muutokset havaitaan 10 ja 25 kierroksen jälkeen tilavuuden muutoksena sekä vedenimeytymisen määränä.

Koe on tarkoitettu betonille ja maabetonin lujuus on kokeen vaatavuutta ajatellen alhainen. Maabetonikoekappaleet eivät kestäneet rapautumatta ja hajoamatta koko koesarjaa ja arvosteluperusteita muutettiin vastaamaan koekappaleiden käyttäytymistä kokeessa. Koekappaleiden kestävyyttä arvioitiin sen perusteella, kuinka monta kierrosta ne kestivät hajoamatta. Koekappale katsottiin hajonneeksi silloin, kun se oli katkennut kahtia tai menettänyt täysin sylinterimäisen muotonsa ja oli halkaisijaltaan alle 6 cm.

ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-821-1  
TIEH 3200712